

# ***Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México***

## ***Volumen III - Técnicas Básicas de Estimación de Emisiones***

Elaborado para:

*La Asociación de Gobernadores del Oeste  
y El Comité Asesor Binacional*

*Enero, 1996*

DCN 96-670-017-01  
RCN 670-017-20-04

**MANUALES DEL PROGRAMA DE INVENTARIOS DE  
EMISIONES DE MEXICO**

**VOLUMEN III - TECNICAS BASICAS DE ESTIMACION  
DE EMISIONES**

*Elaborado para:*

La Asociación de Gobernadores del Oeste  
Denver, Colorado

y

El Comité Asesor Binacional

*Elaborado por:*

Radian Corporation  
10389 Old Placerville Road  
Sacramento, CA 95827

Mayo 17, 1996

# PREFACIO

---

La contaminación del aire puede tener impactos negativos sobre la salud pública cuando su concentración en la atmósfera alcanza niveles significativos. En la mayor parte de las áreas rurales los problemas de calidad del aire se dejan sentir sólo en raras ocasiones mientras que con frecuencia en muchos ambientes urbanos se registran elevadas concentraciones de contaminantes. Durante los años recientes, México ha tenido un gran crecimiento en la urbanización y en la actividad industrial lo que ha generado serias preocupaciones acerca de la calidad del aire en diversas regiones del País.

La contaminación del aire resulta de una compleja mezcla de, literalmente, miles de fuentes, que van desde las chimeneas industriales y los vehículos automotores, hasta el uso individual de productos de aseo, limpiadores domésticos y pinturas. Incluso la vida animal y vegetal puede desempeñar un papel importante en el problema de la contaminación del aire. Debido a la compleja naturaleza de la contaminación del aire se requieren planes regionales detallados para identificar las fuentes de emisión así como el desarrollo de métodos para reducir el impacto sobre la salud ocasionado por la exposición a los contaminantes. Entre algunos ejemplos de las actividades de planeación de la calidad del aire están:

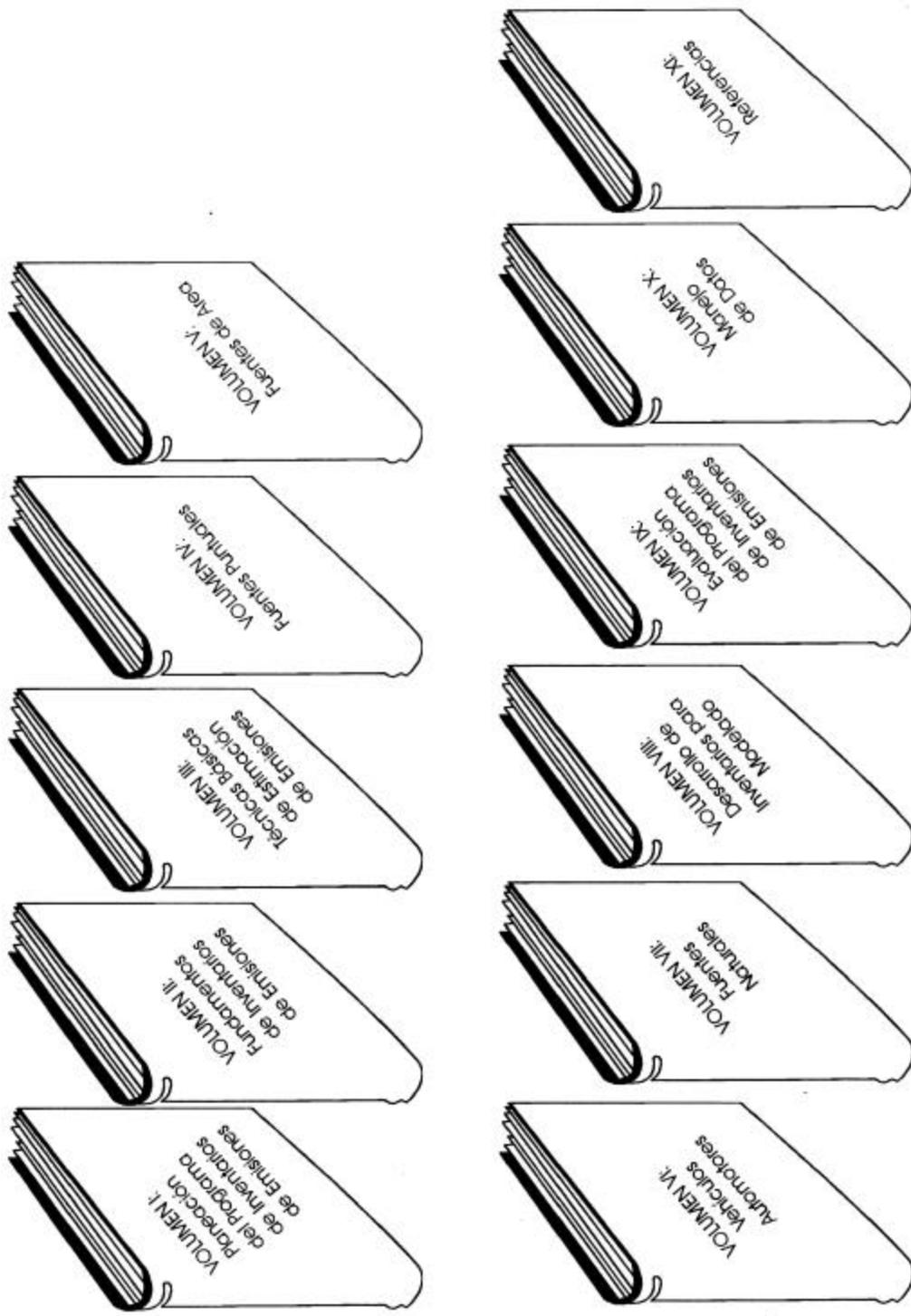
- la aplicación de modelos de calidad del aire
- el examen de las fuentes emisoras de contaminantes para analizar el control de emisiones cuando así se requiere
- el desarrollo de proyecciones de las emisiones para examinar posibles cambios en la futura calidad del aire

- el análisis de las tendencias de emisión y
- el análisis del transporte de las emisiones de una región a otra.

El desarrollo de inventarios de emisión básicamente correctos es un aspecto clave en cada una de estas funciones de planeación de la calidad del aire.

El cálculo de estimaciones de emisión que cumplan con las necesidades de planeación de la calidad del aire requiere de un desarrollo y refinamiento continuos. Los esfuerzos para hacer inventarios “de una sola vez” no son adecuados para el proceso de planeación de la calidad del aire. Para obtener un beneficio duradero debe implantarse un *programa de inventarios* de manera que puedan desarrollarse estimaciones exactas de las emisiones para todas las regiones geográficas de importancia que puedan refinarse con el paso del tiempo y que puedan aplicarse efectivamente en el proceso de planeación y monitoreo de la calidad del aire. De esta manera, se está desarrollando un conjunto de manuales de inventarios que puedan usarse en todo el País para ayudar a coordinar el desarrollo de estimaciones de emisiones consistentes. Estos manuales son para uso de autoridades locales, estatales y federales, así como para uso de consultores privados y de la industria. El propósito de estos manuales es ayudar en el proceso de implantación del programa de inventarios y en su mantenimiento a lo largo del tiempo de manera que los inventarios de emisiones se puedan desarrollar en ciclos periódicos mejorándolos continuamente.

Los manuales abarcan elementos del programa de inventarios tales como la estimación de emisiones, la planeación del programa, manejo de bases de datos, validación de emisiones y otros temas de importancia. La Figura 1 muestra la serie completa de manuales que serán desarrollados para apoyar un programa de inventarios de largo alcance. A continuación se resume el propósito principal de cada manual.



Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México

**Volumen I - Planeación del Programa de Inventarios de Emisiones.** Este manual presenta los aspectos de planeación que deben ser considerados en un programa de inventario de emisiones al aire. La planeación del programa no se presenta como una actividad "terminal", sino más bien como un proceso continuo para asegurar el crecimiento en el largo plazo y el éxito del programa de inventarios. *Temas Clave:* propósito del programa; usos finales del inventario; requerimientos regulatorios; coordinación en los niveles federal, estatal y local; requerimientos de personal y de manejo de datos; identificación y selección de estudios especiales.

**Volumen II - Fundamentos de Inventarios de Emisiones.** Este manual presenta los fundamentos básicos para la preparación de inventarios de emisiones y presenta los elementos que son aplicables a los diversos tipos de fuentes (e. g., puntuales y de área) para evitar la necesidad de que sean repetidos en cada volumen. *Temas Clave:* regulaciones aplicables; efectividad de la regla; penetración de la regla; definiciones sobre contaminantes (e. g., cómo excluir de manera adecuada los compuestos volátiles no reactivos); definición de fuentes puntuales y de área; reconciliación de fuentes puntuales y de área.

**Volumen III - Preparación de Inventarios de Emisiones: Técnicas Básicas de Estimación de Emisiones (TEEs).** Este documento presenta las TEEs básicas utilizadas para hacer estimaciones de emisiones, incluyendo ejemplos y cálculos como muestra se identifican las herramientas para inventarios asociadas con cada metodología y se incluyen en el Volumen XI (Referencias). *Temas Clave:* muestreo en la fuente, modelos de emisiones, encuestas, factores de emisión, balance de materiales y extrapolación.

**Volumen IV - Fuentes Puntuales.** Este manual proporciona guías para elaborar inventarios de emisiones de fuentes puntuales. Incluye una tabla de referencias cruzadas para cada combinación de industria y tipo de dispositivo (e. g., refinación de petróleo y dispositivos de combustión) con una o más de las TEEs presentadas en el Volumen III. *Temas Clave:* tabla de referencias cruzadas; parámetros de chimenea; dispositivos de control; consideraciones de diseño y de proceso; diferencias geográficas y variabilidad en México; aseguramiento y control de calidad (AC/CC); procesos pasados por alto; referencias de datos y formas para recopilación de datos.

**Volumen V - Fuentes de Area (incluyendo fuentes móviles que no circulan por carreteras).** Este manual contiene los lineamientos para el desarrollo de inventarios de emisiones de fuentes de área. Después de presentar información general sobre las fuentes de área, se da una tabla para hacer las referencias cruzadas de cada categoría de fuente de área (e. g., aplicación de asfalto) con una o más de las TEEs básicas que se presentan en el Volumen III. Posteriormente, se comenta la información específica para cada categoría de fuente definida en la tabla. *Temas Clave:* categorización y definición de fuentes de área; tabla de referencias cruzadas; factores de control; diferencias geográficas y variabilidad en México; AC/CC; referencias de datos; formas para recopilación de datos (cuestionarios).

**Volumen VI - Vehículos Automotores.** Debido a que los vehículos automotores son intrínsecamente diferentes a las fuentes puntuales y a las de área, tanto los métodos de estimación disponibles como los datos requeridos son también diferentes. Para estimar las emisiones de estas complejas fuentes los modelos son las herramientas preferidas. Muchos de estos modelos utilizan datos de pruebas extensivas aplicables a un país o a una región determinados. Este manual se enfoca principalmente en la fase de desarrollo de datos para la estimación de emisiones de vehículos automotores. *Temas Clave:* métodos de estimación disponibles; datos e información primarios, secundarios y terciarios; categorización de fuentes; fuentes de factores de emisión; variabilidad geográfica dentro de México, AC/CC.

**Volumen VII - Fuentes Naturales.** Este manual da lineamientos para el desarrollo de inventarios de emisiones de fuentes naturales (e. g., compuestos orgánicos volátiles biogénicos [COV] y óxidos de nitrógeno [ $\text{NO}_x$ ]) en suelos. Además, incluye los aspectos teóricos de los cálculos de emisiones y la discusión de modelos específicos. *Temas*

*Clave:* categorización y definición de fuentes; mecanismos de emisión; algoritmos básicos de emisión; determinación de biomasa; desarrollo de datos de uso y cobertura del suelo; ajustes temporales y meteorológicos; enfoques para el cálculo de emisiones.

**Volumen VIII - Desarrollo de Inventarios para Modelado.** Este manual proporciona los lineamientos para el desarrollo de datos de inventarios que serán utilizados en modelos de calidad del aire y trata aspectos tales como la localización temporal y espacial, la especiación y la proyección de estimaciones de emisiones. *Temas Clave:* definición de términos de modelado; ajuste estacional; localización temporal y espacial; especiación química y proyecciones (crecimiento y factores de control).

**Volumen IX - Evaluación del Programa Inventarios de Emisiones.** Este manual consta de tres partes: AC y CC, análisis de incertidumbre y verificación de emisiones. La parte de AC y CC define el programa global de aseguramiento y control de calidad y se ha escrito para complementar los procedimientos de AC y CC para fuentes específicas que se presentan en otros manuales. El análisis de incertidumbre no sólo incluye métodos para evaluar la incertidumbre en las estimaciones de emisiones, sino también para evaluar la incertidumbre en los valores de modelado tales como los perfiles de especiación y los factores de proyección de emisiones. La sección de verificación de emisiones describe varios análisis que se pueden hacer para examinar la exactitud de las estimaciones de emisiones. Los ejemplos incluyen modelos de receptores y análisis de trayectoria combinados con técnicas específicas de el análisis de datos. *Temas Clave:* descripción de conceptos y definición de términos; protocolo de revisión de inventarios; revisiones de integridad, exactitud y consistencia; TEEs de incertidumbre recomendadas y TEEs aplicables de verificación de emisiones.

**Volumen X - Manejo de Datos.** Este manual trata de las necesidades importantes asociadas con el elemento de manejo de datos del programa nacional de inventarios de emisiones de México. *Temas Clave:* sistemas y herramientas de manejo de datos con propósitos generales; sistemas y herramientas de software de propósitos específicos; sistemas de codificación; confidencialidad; presentación electrónica; frecuencia de actualizaciones, mantenimiento de registros; bases de datos específicas de México y reportes.

**Volumen XI - Referencias.** Este manual es un compendio de las herramientas que pueden utilizarse en el desarrollo de un programa de inventarios de emisiones. Se incluyen las herramientas citadas para hacer inventarios en los otros manuales (e. g., documentos impresos y electrónicos, así como modelos de computadora).

# CONTENIDO

---

Sección	Pág.
PREFACIO .....	i
1.0 INTRODUCCION .....	1-1
2.0 ECUACION FUNDAMENTAL PARA LA ESTIMACION DE EMISIONES .....	2-1
3.0 MUESTREO EN LA FUENTE.....	3-1
3.1 Información General .....	3-1
3.2 Ejemplo de Cálculos usando Datos de Muestreos en la Fuente.....	3-6
3.3 Ejemplo de Cálculos usando Datos de Sistemas MCE .....	3-10
3.3.1 Cálculo de Emisiones horarias a partir de Mediciones de Concentración .....	3-12
3.3.2 Cálculo de la Tasa de Flujo del Gas en la Chimenea.....	3-13
4.0 MODELOS DE EMISION.....	4-1
4.1 Modelos Mecanísticos .....	4-2
4.1.1 Tanques de Almacenamiento.....	4-4
4.1.2 Operaciones de Carga de Derivados del Petróleo.....	4-13
4.1.3 Rellenos Sanitarios .....	4-15
4.1.4 Modelos de Emisiones al aire de Residuos y Aguas Residuales.....	4-18
4.1.5 Polvos Fugitivos .....	4-23
4.2 Modelos de Emisiones de variable múltiple .....	4-29
4.2.1 Desarrollo de un Modelo de Emisiones de variable múltiple .....	4-30
4.2.2 Ejemplo de un Modelo de variable múltiple - Actividades de Construcción .....	4-31
5.0 ENCUESTAS .....	5-1
5.1 Planeación Inicial .....	5-4
5.2 Identificación del Establecimiento.....	5-7
5.3 Selección de la Muestra.....	5-9
5.4 Determinación del Tamaño de Muestra .....	5-13
5.5 Limitación del Tamaño de Encuestas Postales .....	5-16
5.6 Diseño de los Cuestionarios .....	5-16

5.7	Envío y Rastreo de los Cuestionarios.....	5-19
5.8	Contactos Posteriores.....	5-22
5.9	Acceso a los Archivos de Contaminación del Aire de la Agencia.....	5-22
5.10	Escalamiento de los Resultados de la Encuesta .....	5-23
6.0	FACTORES DE EMISION .....	6-1
6.1	Factores de Emisión Basados en Procesos .....	6-1
6.2	Factores de Emisión Basados en Censos .....	6-4
6.2.1	Factores de Emisión Per Cápita.....	6-5
6.2.2	Factores de Emisión Por Empleado.....	6-7
7.0	BALANCE DE MATERIALES .....	7-1
8.0	EXTRAPOLACION.....	8-1
9.0	REFERENCIAS.....	9-1
APENDICE III-A:	MUESTRA DE CALCULOS PARA MODELOS DE EMISIONES	
APENDICE III-B:	COMO OBTENER LAS HERRAMIENTAS PARA ESTIMAR EMISIONES AL AIRE DE LA U.S. EPA	
APENDICE III-C:	MUESTRA DE CUESTIONARIO PARA FUENTES PUNTUALES (I. E., ENCUESTA INDUSTRIAL DEL INE)	

# FIGURAS Y TABLAS

---

<b>Figuras</b>		<b>Pág.</b>
1	Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México .....	iii
2-1	Jerarquía de la Estimación de Emisiones .....	2-2
3-1	Sistema de Muestreo de Partículas (Tren de Muestreo del Método 5 de la U.S. EPA).....	3-4
3-2	Sistema de Monitoreo Continuo de Emisiones (MCE).....	3-5
4-1	Ejemplo del Modelado Mecanístico .....	4-5
4-2	Graficación de Emisiones de PM <sub>10</sub> vs. Variables del Sistema.....	4-36
5-1	Ejemplo de Encuesta para Fuentes Puntuales .....	5-2
5-2	Ejemplo de Encuesta para Fuentes de Area.....	5-3
5-3	Influencia del Tamaño de la Muestra sobre la Incertidumbre .....	5-14
6-1	Ejemplos de Factores de Emisión .....	6-2
7-1	Ejemplos de Balance de Materiales .....	7-3
7-2	Ejemplo de Balance de Materiales haciendo Resaltar las Emisiones Fugitivas .....	7-7
8-1	Ejemplos de Extrapolación.....	8-2
<b>Tablas</b>		<b>Pág.</b>
3-1	Lista de Variables y Símbolos para Cálculos de Emisiones .....	3-6
3-2	Ejemplo de Resultados de un MCE para una Caldera que Quema Combustóleo .....	3-11
3-3	Factores F <sub>d</sub> para algunos. Combustibles.....	3-15

---

4-1	Parámetros Requeridos para Tanques de Techo Fijo, y Valores por Omisión (U.S.) .....	4-8
4-2	Parámetros Requeridos para Tanques de Techo Flotante, y Valores por Omisión (U.S.) .....	4-11
4-3	Parámetros Requeridos para Operaciones de Carga, y Valores por Omisión (U.S.) .....	4-14
4-4	Parámetros Requeridos para Rellenos Sanitarios, y Valores por Omisión (U.S.).....	4-17
4-5	Trayectoria de las Fuentes de Emisión de Area de Residuos Peligrosos .....	4-19
4-6	Parámetros Requeridos en el Ejemplo de Modelos de Residuos y Aguas Residuales .....	4-21
4-7	Parámetros Requeridos para Polvos Fugitivos, y Valores por Omisión (U.S.) .....	4-27
4-8	Tasas de Actividad y Parámetros del Factor de Emisión Necesarios para Estimar Emisiones de la Construcción.....	4-33
5-1	Tipos de Métodos de Muestreo para Encuestas.....	5-10

# ACRONIMOS

---

AC	Aseguramiento de Calidad
API	American Petroleum Institute ( <i>Instituto Americano del Petróleo</i> )
ASTM	American Society for Testing and Materials ( <i>Sociedad Americana de Pruebas y Materiales</i> )
BIF	boiler and industrial furnace ( <i>caldera y horno industrial</i> )
Btu	British Thermal unit ( <i>Unidad Térmica Británica</i> )
CAA	Clean Air Act ( <i>Ley del Aire Limpio</i> )
CANACINTRA	Cámara Nacional de la Industria de Transformación
CC	Control de Calidad
CFR	Code of Federal Regulations ( <i>Código de Regulaciones Federales</i> )
CMAP	Clasificación Mexicana de Actividades y Productos
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
COVs	Compuestos orgánicos volátiles
DDF	Departamento del Distrito Federal
dscfm	dry standard cubic feet per minute ( <i>Pie cúbico estándar seco por minuto</i> )
dscm	dry standard cubic meter ( <i>Metro cúbico estándar seco</i> )
FIRE	Factor Information Retrieval System ( <i>Sistema de Recuperación de Información sobre factores</i> )
ft <sup>3</sup>	pie cúbico
GHG	greenhouse gas ( <i>gas con efecto invernadero</i> )

---

gr/dscf	granos por pie cúbico seco estándar
HAP	hazardous air pollutant ( <i>contaminante atmosférico peligroso</i> )
HCl	ácido clorhídrico
HCT	Hidrocarburos totales
hr	hora
ID	identificación
INE	Instituto Nacional de Ecología
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change ( <i>Panel Intergubernamental para el Cambio Climático</i> )
Kb	kilobyte
kg	kilogramo
kJ	kilojoule
km	kilómetro
L	litro
LAEEM	Landfill Air Emissions and Estimation Model ( <i>Modelo de Emisiones al Aire y estimación de Rellenos Sanitarios</i> )
lb	libra
LPG	gas licuado de petróleo
m <sup>3</sup>	metro cúbico
MCE	Monitor Continuo de Emisiones
Mg	megagramo (i.e., 10 <sup>6</sup> g = 1 tonelada métrica)
mg	miligramo
NH <sub>3</sub>	amoníaco
NO <sub>x</sub>	óxidos de nitrógeno
O <sub>2</sub>	oxígeno

---

OAQPS	Office of Air Quality Planning and Standards ( <i>Oficina de Planeación y Estándares de la Calidad del Aire</i> )
OH	Radicales hidroxilo
OMS	Organización Mundial de la Salud
PM	partículas
PM <sub>10</sub>	partículas de diámetro inferior o igual a 10 micrómetros
ppbv	partes por billón en volumen
ppmv	partes por millón por volumen (aquí, 1 billón =10 <sup>9</sup> )
psig	libras por pulgada cuadrada - presión manométrica
PST	partículas suspendidas totales
RO <sub>2</sub>	radicales peroxi
SO <sub>2</sub>	dióxido de azufre
SO <sub>x</sub>	óxidos de azufre
TEE	Técnica de Estimación de Emisiones
THC	Total hydrocarbons ( <i>hidrocarburos totales</i> )
ton	tonelada inglesa (i. e., 2,000 lbs)
tonne	tonelada métrica (i. e., 1,000 kg)
tpa	toneladas por año

TSDf	treatment, storage and disposal facilities ( <i>instalaciones, para tratamiento, almacenamiento y disposición</i> )
U.S. EPA	United States Environmental Protection Agency ( <i>Agencia de Protección Ambiental de EU</i> )

# 1.0 INTRODUCCION

---

Este manual presenta las técnicas básicas de estimación de emisiones (TEEs) que se usan para hacer estimaciones de emisiones de fuentes puntuales y de área (incluyendo las fuentes móviles que no circulan por carreteras). Las TEEs básicas que se presentan aquí se identificaron al examinar los métodos para hacer inventarios que actualmente se utilizan en México, Europa, Asia y EU. También se revisaron las técnicas desarrolladas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y aquéllas que se emplean para calcular inventarios de emisiones de gases con efecto invernadero a escala global. Las seis diferentes TEEs básicas identificadas son:

- **Muestreo en la Fuente:** son mediciones directas de la concentración de contaminantes en un volumen conocido de gas y de la tasa de flujo del gas en la chimenea. Son utilizadas con mayor frecuencia para fuentes de emisiones de combustión.
- **Modelos de Emisión:** son ecuaciones desarrolladas cuando las emisiones no se relacionan directamente con un solo parámetro. Se pueden usar computadoras en el caso de que se tenga un gran número de cálculos complejos. Por ejemplo, el programa TANKS de la U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA) es un modelo de emisiones computarizado que se usa para estimar emisiones de tanques de almacenamiento.
- **Encuestas:** son cuestionarios diseñados para recopilar datos de emisiones. A menudo son utilizados para recopilar datos de fuentes puntuales desarrollados a nivel de establecimiento o bien datos de fuentes de área de un muestreo representativo de fuentes dentro de una categoría dada.
- **Factores de Emisión:** son relaciones entre la cantidad de un contaminante emitido y una sola unidad de actividad. La actividad puede, consistir en datos basados en procesos (e. g., producción, horas de operación, área superficial) o en datos basados en censos (e. g., población, número de empleados).

- Balance de Materiales: se usan mediciones de todos los componentes, de un proceso, excepto el aire para determinar las emisiones al aire. Es utilizado con mayor frecuencia para fuentes de evaporación de solventes cuando no hay datos disponibles para apoyar los otros enfoques.
- Extrapolación: consiste en el escalamiento de las emisiones de una fuente dada a otra con base en un parámetro de escalamiento conocido para ambas fuentes (e. g., cantidad de producción, área del terreno, número de empleados).

En este manual se explica y comenta con detalle cada una de las TEEs básicas. Además se presentan muestras de cálculos para ilustrar la instrumentación de cada TEE básica.

El manual de TEEs básicas está hecho para utilizarse en conjunto con los manuales de Fuentes Puntuales y Fuentes de Área (volúmenes IV y V, respectivamente). Cada uno de éstos contiene una tabla que con referencias cruzadas entre cada categoría de fuente puntual o de área con una o más de las TEEs básicas que pueden usarse para calcular estimaciones de emisiones. Por ejemplo, para las emisiones de combustión de las plantas generadoras de energía eléctrica, la tabla de referencias cruzadas del Manual de Fuentes Puntuales muestra al usuario que el muestreo en la fuente, los factores de emisión o el balance de materiales son las TEEs básicas que se usan para desarrollar estimaciones de emisiones para esta categoría de fuente. Estos métodos básicos se describen en este manual de TEEs básicas.

El resto de este manual está organizado de la siguiente manera:

- Sección 2.0: presenta la ecuación básica para la estimación de emisiones y define y proporciona una guía general sobre las fuentes de información para cada variable de la ecuación
- Sección 3.0: trata el muestreo en la fuente
- Sección 4.0: presenta los modelos de emisión (mecánicos y de variable múltiple)
- Sección 5.0: comenta la encuesta
- Sección 6.0: cubre los factores de emisión (basados en procesos y basados en censos)
- Sección 7.0: describe los cálculos de balances de materiales
- Sección 8.0: explica la extrapolación
- Apéndice III-A: contiene muestras de cálculos para modelos de emisiones
- Apéndice III-B: contiene información acerca de la manera de obtener las herramientas de estimación de emisiones al aire de la U.S. EPA
- Apéndice III-C: contiene un ejemplo de la forma de encuesta para un cuestionario de una fuente puntual (i. e., Encuesta Industrial del INE).

## 2.0 ECUACION FUNDAMENTAL PARA LA ESTIMACION DE EMISIONES

---

El desarrollo de un programa de inventario de emisiones para México requerirá de una combinación de enfoques. No existe ningún método único que pueda usarse para estimar las emisiones de todas las categorías de fuente. La Figura 2-1 ilustra varios enfoques que deberían tomarse en cuenta para estimar emisiones cuando se analizan los costos en relación con la calidad de los resultados. En regiones con serios impactos ambientales ocasionados por la contaminación del aire se pueden asegurar métodos más elaborados y costosos, por ejemplo muestreo en la fuente para determinar las emisiones. Por el contrario, en aquellas regiones que tienen problemas ambientales mínimos, el uso de métodos de estimación menos costosos, como el de los factores de emisión, puede ser aceptable.

La ecuación fundamental para estimar emisiones es:

(2-1)

$$E = A \times EF \times [1 - (CE/100 \times RE \times RP)] \times T \times M\%$$

donde:

- E = Tasa de Emisión
- A = Tasa de Actividad (e.g., producción, población, etc.)
- EF = Factor de Emisión (lb/unidad de tasa de actividad)
- CE = Eficiencia de Control (%)
- RE = Efectividad de la Regla
- RP = Penetración de la Regla
- T = Ajuste Temporal
- M% = Masa porcentual de Contaminante



Figura 2-1. Jerarquía de la Estimación de Emisiones

La exactitud de la estimación de emisiones depende de la exactitud relativa de cada uno de estos componentes individuales. Si se introducen errores en cualquiera de ellos se afectará la estimación final de las emisiones.

La información presentada en este manual se enfoca en los dos primeros componentes de la ecuación básica para estimar emisiones: Los factores de emisión y las tasas de actividad. Las eficiencias de control se tratan con mayor detalle en los Manuales de Fuentes Puntuales y Fuentes de Área (Volúmenes IV y V, respectivamente). La efectividad y la penetración de la regla se ven con más profundidad en el Manual de Fundamentos de Inventarios de Emisiones (Volumen II). El ajuste temporal y la masa porcentual de contaminante (i. e., compuestos no reactivos y perfiles de especiación) se explican con más detalles en el Manual para el Desarrollo de Inventarios para Modelado (Volumen VIII). El resto de esta sección presenta las definiciones de cada componente de la ecuación básica para estimar emisiones y guías generales acerca de dónde encontrar información sobre cada uno.

**Tasas de Actividad.** En general, los datos de actividad se relacionan con los procesos emisores. En los procesos industriales, los datos de actividad por lo general están dados como tasas del proceso en peso (e. g., kg, ton ó L mensuales de material utilizado o manufacturado). De manera semejante, para el equipo en que se quema combustible, los datos se dan como tasas de consumo de combustible (e. g., tons, L ó m<sup>3</sup>, ó MJ por hora o por mes). En muchos casos se deben aplicar factores de conversión para transformar los valores de consumo o de producción reportados en unidades que correspondan a las unidades de producción del factor de emisión (e.g., tons, barriles, etc.). Además, si se utilizan factores de emisión de Estados Unidos, también puede necesitarse hacer conversiones de unidades estándar a métricas. Por lo general, los datos de actividad para fuentes puntuales se basan en procesos, y es muy probable que sean recopilados por el personal de la planta y se reporten a la Agencia en un formato resumido (e. g., el cuestionario industrial). Con frecuencia, los datos de

actividad para fuentes de área a menudo son sustitutos que se demuestra o se asume que están correlacionados con el proceso emisor (e. g., número de empleados). Los datos de actividad para fuentes de área son recopilados, en general, por la agencia a partir de los datos disponibles de censos (e. g., del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI]), o haciendo encuestas en plantas pequeñas.

**Factores de Emisión.** Un factor de emisión es una relación entre la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera y una unidad de actividad. En general, los factores de emisión se clasifican en dos tipos: los basados en procesos y los basados en censos. Por lo común los primeros se usan para hacer estimaciones de las emisiones de fuentes puntuales, y a menudo se combinan con los datos de actividad recopilados con encuestas o con balances de materiales. Por otra parte, los factores de emisión basados en censos, se usan mucho para hacer estimaciones de las emisiones de fuentes de área. La fuente más completa de factores de emisión específicos para los E.U., para los contaminantes criterio es la publicación *AP-42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors* (U.S. EPA, 1995a). [AP-42 Recopilación de Factores de Emisión de Contaminantes del Aire (U.S. EPA, 1995a.) Asimismo, el documento Factor Information Retrieval System (FIRE) (Sistema de Recuperación de Información sobre Factores de la EPA) es una reunión de factores de emisión de contaminantes del aire, tanto criterio como tóxicos.

**Eficiencia de Control.** La eficiencia global de control es el producto de la eficiencia del

dispositivo de captura por la eficiencia del dispositivo de control. La eficiencia del dispositivo de captura indica el porcentaje de la corriente de emisión que es llevado al sistema de control y la eficiencia del dispositivo de control indica el porcentaje de contaminante atmosférico que es removido de la corriente de emisión antes de liberarla a la atmósfera. Los datos de la eficiencia del dispositivo de control pueden ser determinados para un equipo específico a partir de muestreos en la fuente midiendo las concentraciones del contaminante antes y después de la aplicación del dispositivo de control; a partir de datos

bibliográficos (e. g., *Volumen IV—Fuentes Puntuales, Tabla 4-1*) o a partir de las especificaciones de diseño del fabricante o de la especificación del desempeño garantizado. La eficiencia global de control también puede requerir de ajustes para reflejar el tiempo de paro del equipo de control durante las operaciones de mantenimiento o cuando hay perturbaciones.

**Efectividad de la Regla.** La experiencia con los inventarios de emisión ha revelado que los programas regulatorios tienen una efectividad menor al 100 por ciento para la mayor parte de las categorías de fuente. La efectividad de la regla refleja la capacidad de un programa regulatorio para lograr las reducciones requeridas en las emisiones. El propósito de este factor es tomar en cuenta el hecho de que la mayor parte de los dispositivos de control no logran reducir las emisiones hasta las tasas planeadas en todo momento y en todas las condiciones. Las perturbaciones en el proceso, las fallas en el funcionamiento del equipo de control, los errores del operador, el mantenimiento del equipo y otras operaciones no rutinarias son ejemplos típicos de ocasiones en que es de esperarse que el desempeño del dispositivo de control sea inferior al óptimo. Una fracción por omisión del 0.80 (igual a una efectividad del 80 por ciento) fue establecida por la EPA para estimar la efectividad de la regla requerida en algunas regiones; sin embargo, la limitada exactitud de utilizar un solo valor por omisión para todas las categorías de fuente ha sido cuestionada y se sigue trabajando para definir los lineamientos para desarrollar factores de efectividad de la regla para cada tipo específico de fuente.

**Penetración de la Regla.** La penetración de la regla es el grado en el que una regulación abarca las emisiones de todas las fuentes dentro de una categoría. Por ejemplo, se puede hacer una regla que indique que sólo las fábricas de pinturas más grandes deben cumplir con los nuevos requerimientos de control. Si las emisiones de fuentes de área de todas las fábricas de pinturas se estiman en conjunto como una sola categoría de fuente, entonces se debe desarrollar un factor de penetración de la regla, ya que no todas las fábricas estarán sujetas a la regla y, por lo tanto, no todas las emisiones de pintura deberán tener más control.

**Ajuste Temporal.** Tradicionalmente, la mayor parte de los inventarios estiman emisiones anuales. Por lo tanto, todos los procedimientos, factores de emisión y de corrección, así como los niveles de actividad utilizados en el inventario han sido desarrollados para representar condiciones anuales promedio. Para determinadas actividades de planeación de la calidad del aire deben hacerse ajustes temporales a las estimaciones anuales de emisiones. Por ejemplo, con frecuencia, los altos niveles de ozono son asociados con los meses más cálidos del año, mientras que las emisiones de algunas fuentes varían de manera estacional. Para los propósitos de planeación de la calidad del aire, en los inventarios de ozono las emisiones de precursores de este contaminante deberían ser determinadas durante los meses que constituyen la temporada de ozono para sus inventarios. La temporada pico del ozono en la mayor parte de las áreas de EU va de mayo a septiembre. Sin embargo, en la Ciudad de México, la estación más crítica se presenta en el invierno (i. e., del 15 de noviembre al 15 de febrero). Los trabajos de modelado de la calidad del aire a nivel regional pueden requerir tasas de emisión horarias. Los perfiles temporales por omisión (i. e., horas/día, días/semana, semanas/año) se utilizan con frecuencia para desarrollar estimaciones horarias a partir de estimaciones anuales.

**Porcentaje de Masa del Contaminante.** En algunos casos, el contaminante o grupo de contaminantes definido por un factor de emisión no es el mismo que el definido para el inventario de emisiones. Por ejemplo, varios compuestos orgánicos volátiles (COVs) son considerados fotoquímicamente no reactivos por la EPA, conforme a la *Clean Air Act* (CAA) (Ley de Aire Limpio), y no se incluyen en los inventarios de emisiones de COVs en los EU (40 CFR 60, 1992). Muchos de los compuestos no reactivos son COVs halogenados que tienen su principal aplicación como limpiadores de metales y de telas, refrigerantes y propelentes de productos en aerosol. Una importante categoría industrial que utiliza estos compuestos halogenados es la de desengrasado. En otro ejemplo, la gran mayoría de las emisiones de rellenos sanitarios son de metano, que no se considera un COV. Dado que, hasta

donde se sabe, las emisiones de estos diversos procesos están constituidas por COVs no reactivos, podrían ser excluidas de los inventarios de emisiones de hidrocarburos totales (HCT) (e.g., los datos del inventario nacional de emisiones de fuentes puntuales, SNIFF) para algunos propósitos de los inventarios de emisiones, tales como el modelado de ozono. De manera similar, los perfiles de partículas (MP) que muestran datos sobre la distribución del tamaño de partícula, pueden ser utilizados para determinar el porcentaje de masa de las emisiones de partículas suspendidas totales (PST) que deberían incluirse en un inventario de partículas de diámetro aerodinámico inferior a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>).

El porcentaje de masa del contaminante también puede utilizarse para estimar las emisiones de una especie química determinada. Por ejemplo, los perfiles de especiación pueden usarse para obtener datos sobre el porcentaje de berilio en las emisiones de partículas totales de las operaciones de extracción, o el porcentaje de benceno en las emisiones de COVs totales de un tanque de almacenamiento.

# 3.0 MUESTREO EN LA FUENTE

---

**Esta sección describe el uso de los datos de muestreo en la fuente para estimar emisiones de fuentes puntuales. Se presentan ejemplos para ilustrar el cálculo de las emisiones a partir de los datos recopilados durante los muestreos. Se pueden hallar métodos específicos de muestreo en la fuente y procedimientos para reducción de datos en los métodos de referencia publicados (40 CFR 60, 1992).**

Debido a la complejidad técnica del muestreo en la fuente se requiere de tiempo y equipo para obtener datos de emisiones que sean exactos y válidos para numerosos contaminantes de una fuente. En consecuencia, el costo de realizar un muestreo de este tipo en una planta puede ser muy alto. Sin embargo, si se aplica correctamente, este método puede proporcionar una mejor estimación de las emisiones de una fuente que los factores de emisión o los balances de materiales. El uso de datos de muestreo en la fuente reduce el número de suposiciones relacionadas con la aplicabilidad de factores de emisión generalizados, las eficiencias del equipo de control de contaminación del aire, las variaciones del equipo, o las características del combustible que son aplicadas a tipos similares de fuentes de emisión para estimar las tasas de emisión de los contaminantes.

## **2.1 Información General**

El propósito de cualquier programa de muestreo en la fuente es determinar la concentración del contaminante en una corriente de gas ó la tasa de emisión del contaminante de una chimenea o del escape de un proceso. Midiendo la concentración del contaminante en un volumen conocido de gas y determinando la tasa de flujo del gas en una chimenea es posible calcular la tasa de emisión en masa

del contaminante.

Los muestreos en la fuente se integran con mediciones de corto plazo que, por lo general, se realizan tiempos de una a cuatro horas. Para recolectar una muestra representativa deben hacerse tres muestreos en una chimenea o en un escape para cada contaminante de interés condiciones de operación definidas. Las variaciones en la operación del proceso durante el muestreo pueden añadir un alto grado de variabilidad en los datos de muestreo. Por lo tanto, los parámetros clave de la operación de un proceso que pueden afectar las emisiones de contaminantes de la fuente deben ser monitoreados durante la toma de muestras.

La recopilación de datos específicos del proceso durante los muestreos es crítica para correlacionar los resultados del muestreo con la operación del proceso. Por ejemplo, las emisiones fluctúan cuando ocurren cambios en el proceso (e.g. la disminución de la temperatura de una cámara de combustión puede aumentar las emisiones de algunos contaminantes). La recopilación de datos específicos del proceso también es importante para correlacionar las emisiones con la actividad del proceso y para desarrollar factores de emisión. Por ejemplo, si se emiten 0.5 kg/hr de NO<sub>x</sub> durante un muestreo en la fuente de cuatro horas en el cual se quemaron 400 litros de combustible, es posible determinar un factor de emisión de 0.005 kg de NO<sub>x</sub> por litro de combustible. Entonces este factor de emisión específico puede ser usado para estimar las emisiones de NO<sub>x</sub> de esta fuente, basándose en la cantidad de combustible quemado.

Los datos de muestreo en fuente deben usarse para estimar emisiones sólo si los datos se obtuvieron en condiciones representativas de la operación normal del proceso. Los datos de emisión determinados a partir de un muestreo en la fuente pueden extrapolarse para estimar las emisiones anuales de una fuente si la operación del proceso no varía de manera significativa. Si el proceso si tiene variaciones considerables será necesario hacer varios muestreos para obtener resultados representativos. Si la operación de la planta no puede ser caracterizada de manera adecuada los datos del muestreo en la fuente no deben usarse para estimar las emisiones.

Los procedimientos para hacer los muestreos en la fuente se encuentran en diversos métodos de referencia (e. g., métodos de la EPA, métodos para calderas y hornos industriales [BIF, por sus siglas en inglés], etc.). Los métodos de muestreo que describen procedimientos para tomas de muestra en tiempos cortos se conocen como métodos manuales. Éstos, en general, son específicos para un tipo de fuente (e.g., fuentes de combustión con combustibles fósiles, corrientes de gas combustible en refinerías de petróleo y generadores eléctricos de vapor) y para un contaminante (e. g., partículas, ácido sulfhídrico, plomo) o para una clase de compuestos (e. g., dioxinas, COVs). Los sistemas de muestreos por extracción para estos contaminantes consisten, por lo general, de una solución o un medio absorbente para capturar el contaminante, una bomba para jalar la muestra de gas a través de la solución o del medio, y un medidor de gas seco para medir el volumen de la muestra gaseosa. Debido a que se utilizan diferentes tipos de solución o de medio para absorber los diferentes contaminantes, el muestreo en la fuente para varios contaminantes (e. g., metales, partículas, dioxinas) es complejo, de mucho trabajo y costoso. En la Figura 3-1, se muestra esquema de un sistema manual de muestreo utilizado para determinar las emisiones de partículas de una fuente estacionaria (conocido como tren de muestreo del Método 5).

Una alternativa para el muestreo manual en la fuente es el monitoreo continuo, que toma en cuenta la variabilidad del proceso con el tiempo. Para medir las concentraciones de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) e hidrocarburos totales (HCT). Por lo general se utilizan instrumentos o monitores continuos de emisiones (MCEs). También hay MCEs comerciales disponibles para medir opacidad, ácido clorhídrico (HCl) y amoníaco ( $\text{NH}_3$ ). Los MCEs pueden instalarse en la fuente de manera permanente para generar datos las 24 horas del día, o pueden usarse para el monitoreo de las emisiones durante un periodo definido de muestreo en la fuente (e. g., de 1 a 4 horas). Un sistema MCE consiste de una bomba para extraer la muestra gaseosa de la fuente, de una serie de instrumentos o de analizadores para analizar un contaminante específico en el gas y de un sistema de adquisición de datos para registrar la información con el tiempo. En la Figura 3-2 se muestra el esquema de un sistema MCE.

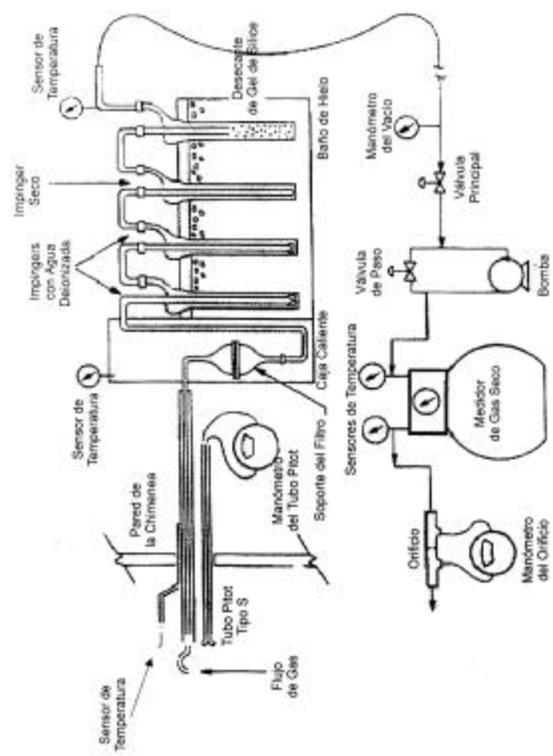


Figura 3-1. Sistema de Muestreo para Partículas (Tren de Muestreo Método 5 de la EPA)

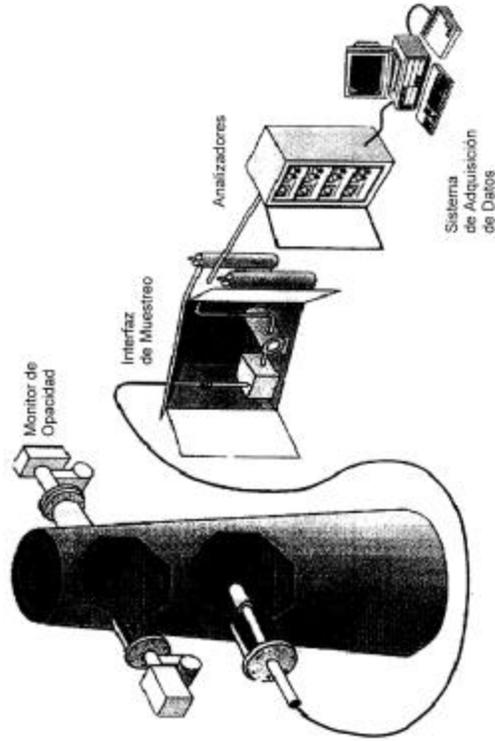


Figura 3-2 Sistema de Monitoreo Continuo de Emisiones (MCE)

## **2.2 Ejemplo de Cálculos en que se usan Datos de Muestreo en la Fuente**

En general, después de que se ha concluido un muestreo, los datos (incluyendo las concentraciones del contaminante y la tasa de flujo volumétrico del gas de escape) son presentados en un informe. La mayor parte de los reportes de muestreo en la fuente resumen las emisiones de cada contaminante expresándolas en cualquiera de los siguientes términos:

- Una tasa de carga de masa o una tasa de emisión (masa de contaminante emitida por unidad de tiempo) ó
- Un factor de emisión (masa de contaminante emitida por unidad de actividad del proceso).

Las variables y símbolos utilizados para los cálculos se enlistan en la Tabla 3-1. Los ejemplos que se proporcionan a continuación muestran la manera de calcular tasas de emisión en masa, o factores de emisión, a partir de datos de muestreo en la fuente.

**Tabla 3-1**

**Lista de Variables y Símbolos para los Cálculos de Emisión**

<b>Variable</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidades</b>
Volumen de la muestra de gas	$\Delta V^a$	metro cúbico normal [base seca] ( $\text{Nm}^3$ )
Masa de partículas recolectadas en la muestra de enjuague	$M_r$	miligramos (mg)
Masa de partículas recolectadas en la muestra del filtro	$M_f$	mg
Tasa de flujo volumétrico del gas de escape en condiciones estándar	Q	metro cúbico normal por hora [base seca] ( $\text{Nm}^3/\text{hr}$ )
Concentración de partículas en el gas de escape	$C_s$	miligramos por metro cúbico normal [base seca] ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ )
Tasa de emisión en masa	TEM	kilogramos por hora (kg/hr)
Tasa anual de emisión en masa	$\text{TEM}_a$	toneladas métricas por año (metric ton/año)
Horas de operación por año	T	Horas por año (hr/año)

### Tabla 3-1 (Continuación)

#### Lista de Variables y Símbolos para los Cálculos de Emisión

Variable	Símbolo	Unidades
Tasa de emisión en masa por actividad	TEM <sub>b</sub>	kilogramos por millón de kjoule (kg/MkJ)
Tasa de consumo de calor de la caldera	R	MkJ/hr
Concentración del contaminante	C	Partes por millón en volumen [base seca] (ppmv).
Peso molecular del contaminante	PM	Gramo por gramo-mol (g/g-mol)
Volumen molar	V	Volumen ocupado por un mol de gas ideal a presión y temperatura estándar (0.024 m <sup>3</sup> /g-mol a 20°C y 1 atmósfera)
Factor de combustible del Método 19 de la EPA	F <sub>d</sub> <sup>b</sup>	Metros cúbicos estándar secos por joule a 0% de oxígeno [base seca] (dscm/J)
Concentración medida de oxígeno	O <sub>2</sub> %	Porcentaje [base seca]
Concentraciones de hidrógeno, carbono, azufre, nitrógeno y oxígeno	H, C, S, N, O	Porcentaje determinado por el análisis de combustible
Poder calorífico superior del combustible	PCS	kjoule por kilogramo (kJ/kg)

<sup>a</sup> El metro cúbico normal está dado a: 0°C y 760 mm Hg.

<sup>b</sup> El metro cúbico estándar está dado a: 20°C y 760 mm Hg.

Dados los siguientes datos específicos para una fuente:

#### Ejemplo 3-1:

$$\Delta V = 0.78 \text{ metros cúbicos normales (Nm}^3\text{)}$$

$$M_r = 5.5 \text{ miligramos (mg)}$$

$$M_f = 9.5 \text{ mg}$$

$$Q = 34,170 \text{ metros cúbicos normales por hora (Nm}^3\text{/hr);}$$

$$T = 2,920 \text{ horas por año (hr/año)}$$

$$R = 118 \text{ millones de kjoules por hora (MkJ/hr).}$$

Calcular la concentración de partículas en el gas de escape en unidades de miligramos por metro cúbico normal ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ):

**Paso 1**

$$\begin{aligned} C_s &= (M_r + M_f) / \Delta V && (3-1) \\ &= (5.5 \text{ mg} + 9.5 \text{ mg}) / 0.78 \text{ Nm}^3 \\ &= 19.2 \text{ mg}/\text{Nm}^3 \end{aligned}$$

Calcular la tasa de emisión en masa, TEM, en kilogramos por hora (kg/hr):

**Paso 2**

$$\begin{aligned} \text{TEM} &= C_s \times Q / (10^6) && (3-2) \\ &= 19.2 \text{ mg}/\text{Nm}^3 \times 34,170 \text{ Nm}^3/\text{hr} / (10^6 \text{ mg}/\text{kg}) = 0.66 \text{ kg}/\text{hr} \end{aligned}$$

Estos datos se expresan en unidades típicas para las emisiones de partículas. Los resultados también pueden expresarse en otras unidades tales como miligramos por metro cúbico normal (base seca) ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$  seco), utilizando factores de conversión estándar. Con frecuencia, las tasas de emisión en masa se expresan en base anual (e. g., toneladas métricas por año). Estas estimaciones generalmente incluyen una tasa anual de uso real (i. e., horas por año) dado que la mayor parte de las fuentes no operan de manera continua durante todo el año.

Asumiendo que la fuente presentada antes opera 2,920 hr/año, calcular la tasa anual de emisión de partículas ( $TEM_a$ ) en toneladas métricas/año:

**Paso 3**

(3-3)

$$TEM_a = TEM \times T / 1,000$$

$$TEM_a = 0.66 \text{ kg/hr} \times 2,920 \text{ hr/año} / (1,000 \text{ kg/tonelada métrica})$$

$$TEM_a = 1.93 \text{ toneladas métricas/año}$$

Algunos datos de emisión se expresan también por unidad de actividad como un factor de emisión. Estos factores de emisión se expresan a menudo como el peso del contaminante emitido por unidad de actividad del proceso. Como ejemplo, calcular la tasa de emisión en masa de la actividad ( $TEM_b$ ) de partículas de una caldera con una tasa de consumo de calor de 118 MMkJ/hr:

**Paso 4**

(3-4)

$$TEM_b = TEM / R$$

$$TEM_b = 0.66 \text{ kg/hr} / (118 \text{ MMkJ/hr})$$

$$TEM_b = 0.0056 \text{ kg/MMkJ}$$

Las concentraciones de contaminantes que están presentes como partícula o un aerosol (e.g.,  $PM_{10}$ , plomo, dioxinas) en general son expresadas en masa por unidades de volumen tales como microgramos por metro cúbico normal. Las concentraciones de otros contaminantes que están presentes como un vapor (e.g.,  $NO_x$ ,  $SO_2$ , CO) se expresan por lo general en unidades de volumen/volumen tales como partes por millón por volumen (ppmv), o partes por billón (ppbv).

## **2.3 Ejemplo de Cálculos Utilizando Datos de MCE**

Para determinar las emisiones de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HCT, y/o CO, una planta se puede instalar un sistema de MCE que mida de manera continua las concentraciones de contaminantes (en ppmv). El sistema de MCE a menudo está equipado con un monitor de oxígeno (O<sub>2</sub>) y/o uno de CO<sub>2</sub>. Estos gases se consideran como gases diluyentes (más que contaminantes), y se monitorean para que sirvan como indicadores de la tasa de flujo de escape los gases de escape y/o del flujo de aire en exceso. En general, las concentraciones de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> se reportan en unidades de porcentaje (en volumen) dado que son mucho más altas que los niveles de los otros gases monitoreados (i. e., ppmv). Dependiendo de los requerimientos regulatorios y del tipo de fuente, los instrumentos se pueden instalar de forma permanente para recoger datos de manera continua durante la operación de la unidad, o pueden ser utilizados temporalmente para recolectar datos durante un periodo de tiempo determinado.

Los datos de concentraciones de MCE son transmitidos por lo general del instrumento al sistema de registro de datos, que está programado para almacenarlos y elaborar reportes en un formato específico. A menudo los datos de concentración se promedian en intervalos específicos de tiempo (e. g., 10 minutos, 1 hora, 24 horas).

Además de las unidades de concentración, los datos de las emisiones se reportan con frecuencia en otras unidades, tales como tasas de emisión en masa (e. g., kg/hr), o como factores de emisión (kg/unidad de proceso). Para convertir las unidades de concentración en estas otras formas de datos se requieren datos adicionales. Para convertir los datos de concentración en datos de tasa en masa, la tasa de flujo volumétrico del gas de escape (i. e., en unidades de metros cúbicos normales por hora) debe ser medida o estimada. La fuente puede estar equipada con un monitor de tasa de flujo del gas de escape que proporciona datos continuos de la

tasa de flujo al sistema; o bien la tasa de flujo puede ser medida utilizando un tubo pitot. También es posible estimar la tasa de flujo con base en mediciones empíricas, en mediciones de la tasa de combustible, en las concentraciones del gas diluyente o en mediciones del aire de admisión (e. g., velocidad del ventilador, posiciones de la compuerta de tiro). Para convertir los datos de emisión en unidades de tasa de emisión (e. g., kg/MMkJ de consumo de calor o kg/tonelada métrica de carbón alimentado), la tasa de unidad de proceso (e.g., kg/MMkJ de consumo de calor o toneladas por hora carbón alimentado) debe ser medida o estimada.

También se pueden usar factores empíricos del combustible, conocidos como factores F, para convertir los datos de tasa de uso de combustible en tasas de consumo de calor o de flujo de gas. Por lo común, los factores F son específicos para un tipo de combustible (e. g., gas natural, combustóleo #2). Algunos ejemplos de factores F que han sido adoptados por la EPA se presentan en el Método 19 (40 CFR 60, 1992).

Las variables y los símbolos usados en los siguientes cálculos se enlistan en la Tabla 3-1. La Tabla 3-2 presenta un ejemplo de los resultados obtenidos en un sistema de MCE, que consta de monitores de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, O<sub>2</sub> y de tasa de flujo, instalados en una chimenea de escape de una caldera alimentada con petróleo. Los datos en la tabla representan una “instantánea” de las emisiones de la caldera durante un periodo de 60 minutos.

## Tabla 3-2

### Ejemplo de Resultados de un MCE para una Caldera que Quema Petróleo

Periodo	O <sub>2</sub> (%V)	SO <sub>2</sub> (ppmv)	NO <sub>x</sub> (ppmv)	CO (ppmv)	Tasa de Flujo de Gas en la Chimenea (Nm <sup>3</sup> /hr)
11:00	2.1	1,004.0	216.2	31.5	33,964
11:15	2.0	1,100.0	200.6	25.5	34,361
11:30	2.1	1,050.0	216.7	25.1	32,891
11:45	1.9	1,070.0	220.5	20.8	34,890
12:00	1.9	1,070.0	213.8	19.4	34,749
Promedio:	2.0	1,058.8	213.6	24.5	34,171

<sup>a</sup> Basado en un valor calorífico del combustible de 41,828 kJ/kg (18,000 Btu/lb).

### 2.3.1 Cálculo de emisiones horarias, a partir de mediciones de concentración

Aunque los MCEs pueden reportar emisiones horarias en tiempo real de manera automática, puede ser necesario estimar de forma manual las emisiones anuales de una fuente a partir de datos horarios de concentración de contaminantes. Esta sección describe la manera de calcular emisiones a partir de datos crudos de concentración de un MCE.

Utilizando los datos de un MCE presentados en la Tabla 3-2, es posible calcular las emisiones horarias en masa de SO<sub>2</sub> para las 11:00:

$$\begin{aligned}
 \text{TEM}_a &= \frac{C \times PM \times Q}{(1,000 \times V \times 10^6)} && (3-5) \\
 &= \frac{1.004 \text{ ppmv} \times 64 \text{ g/g-mol} \times 33.964 \text{ Nm}^3/\text{hr}}{(1000 \text{ g/kg} \times 0.024 \text{ m}^3/\text{g-mol} \times 10^6)} \\
 &= 90.9 \text{ kg/hr}
 \end{aligned}$$

Para calcular la tasa promedio de emisión de masa de SO<sub>2</sub> para todo el periodo de muestreo:

$$\begin{aligned}
 \text{TEM}_{\text{prom}} &= \frac{C_{\text{prom}} \times MW_{\text{prom}} \times Q_{\text{prom}}}{(1,000 \times V \times 10^6)} && (3-6) \\
 &= \frac{1.058.8 \text{ ppmv} \times 64 \text{ g/g-mol} \times 34.171 \text{ Nm}^3/\text{hr}}{(1000 \text{ g/kg} \times 0.024 \text{ m}^3/\text{g-mol} \times 10^6)} \\
 &= 96.5 \text{ kg/hr}
 \end{aligned}$$

Las emisiones anuales de SO<sub>2</sub> pueden ser calculadas utilizando la

ecuación 3-3, y asumiendo que la caldera opera durante 2,920 horas anuales.

$$\begin{aligned} \text{TEM}_a &= 96.5 \text{ kg/hr} \times 2,920 \text{ hr/año} / (1,000 \text{ kg/tonelada métrica}) \\ &= 282 \text{ toneladas métricas/año} \end{aligned}$$

Suponiendo que el consumo de calor de la caldera es de 118 MMkJ/hr, la tasa de emisión de actividad de SO<sub>2</sub> puede ser calculada utilizando la ecuación 3-4:

$$\begin{aligned} \text{TEM}_b &= 96.5 \text{ kg/hr} / (118 \text{ MMkJ/hr}) \\ &= 0.82 \text{ kg/MMkJ} \end{aligned}$$

### 2.3.2 Cálculo de la tasa de flujo del gas en la chimenea

Cuando no se dispone de mediciones directas de las tasas de flujo del gas en la chimenea, Q puede calcularse utilizando factores del combustible (factores F). El factor F es la relación del volumen gaseoso de los productos de combustión con el contenido de calor del combustible e incluye todos los componentes de la combustión excepto el agua. Este factor puede ser calculado a partir de los resultados de un análisis elemental del combustible utilizando la siguiente ecuación:

$$F_d = \frac{10^6 [3.64(\%H) + 1.53(\%C) + 0.57(\%S) + 0.14(\%N) - 0.46(\%O)]}{\text{HHV}} \quad (3-7)$$

Los valores caloríficos de los combustibles están disponibles en publicaciones tales como *Steam, Its Generation and Use* (Stultz and Kitto, 1992). Los factores F promedio están en el Método de Referencia 19 de la EPA para diferentes combustibles y se presentan en la Tabla 3-3.

Utilizando los datos del MCE en la Tabla 3-2 y el factor F para petróleo de la Tabla 3-3 es posible calcular la tasa de flujo del gas en la chimenea de la caldera.

**Ejemplo 3-3:**

$$\begin{aligned} Q &= F_d \times \frac{20.9\%}{20.9\% - O_2\%} \times R \times 10^9 \\ &= 2.47 \times 10^{-7} \text{ dscm/J} \times \frac{20.9\%}{20.9\% - O_2} \times 118 \text{ MMkJ/hr} \times 10^9 \text{ J/MMkJ} \\ &= 32,230 \text{ dscm/hr} \end{aligned}$$

**Tabla 3-3****Factores  $F_d$  para Diversos Combustibles<sup>a</sup>**

Tipo de Combustible	$F_d$	
	dscm/J <sup>b</sup>	dscf/MMBtu
Carbón:		
Antracita <sup>c</sup>	$2.71 \times 10^{-7}$	10,100
Bituminoso <sup>c</sup>	$2.62 \times 10^{-7}$	9,780
Lignito	$2.65 \times 10^{-7}$	9,860
Petróleo <sup>d</sup>	$2.47 \times 10^{-7}$	9,190
Gas:		
Natural	$2.34 \times 10^{-7}$	8,710
Propano	$2.34 \times 10^{-7}$	8,710
Butano	$2.34 \times 10^{-7}$	8,710
Madera	$2.48 \times 10^{-7}$	9,240
Cortezas de Madera	$2.58 \times 10^{-7}$	9,600

<sup>a</sup> Determinado en condiciones estándar: 20°C (68°F) y 760 mm Hg (29.92 in. Hg).

<sup>b</sup> dscm/J = metros cúbicos estándar secos por Joule

<sup>c</sup> Clasificado de acuerdo con el ASTM Método D 388-77.

<sup>d</sup> Crudo, residual o destilado.

## **4.0 MODELOS DE EMISIONES**

---

Muchas estimaciones de emisiones se desarrollan utilizando un factor de emisión que supone una relación lineal (i. e., un “factor de emisión”) entre la tasa de emisión y una unidad de actividad (e. g., cantidad de combustible consumido, tasa de producción, población, empleo, etc.). Para ciertas categorías de fuente la relación funcional entre las emisiones, los procesos múltiples y las variables ambientales se estudia suficientemente para soportar el desarrollo de modelos complejos. Si estos modelos de emisión requieren cálculos complejos o grandes volúmenes de datos para alimentarlos, es probable que se basen en computadoras.

Si bien los modelos están diseñados para producir estimaciones más exactas que las obtenidas con factores de emisión, la exactitud de la estimación siempre dependerá de la calidad de los datos con que se alimente el modelo y de las suposiciones en que se base. Por lo tanto, antes de decidir utilizar un modelo como la alternativa para un tipo específico de fuente es importante comparar las necesidades del modelo de emisión con los datos disponibles. Los requerimientos de datos son variables. Para estimar emisiones pueden requerirse uno o varios parámetros físicos de la fuente para la cual se usará el modelo.

Algunos modelos de emisiones desarrollados en otros países pueden aplicarse en México. En estos casos es muy importante consultar los manuales del usuario para identificar cualesquier valores por omisión que sean asumidos en ausencia de valores definidos por el usuario, y tratar de evaluarlos si estos valores son adecuados para usarse en México. Asimismo, es importante revisar que la conversión de las unidades métricas de los datos disponibles a las unidades estándar inglesas requeridas sea correcta si se están aplicando modelos de los EU.

Los modelos de emisión pueden clasificarse en tres tipos: adaptativos, mecánicos y de variable múltiple. Los primeros están basados en un paquete de cómputo que integra redes neurales, lógica confusa (“fuzzy”) y sistemas caóticos en un solo paquete (Collins and Terhune, 1994). Durante la etapa inicial se carga el programa como los datos históricos de operación y los de emisiones. Los parámetros de operación se monitorean entonces y son utilizados por el sistema del programa (o “softMCE) para predecir las emisiones a un costo menor que el de la aplicación de un equipo real de MCE. Sin embargo, el precio de un programa adaptativo todavía puede ser bastante elevado, cercano a los 100,000 dólares. Por lo tanto, estos modelos no se recomiendan para los trabajos de inventarios en el corto plazo en México debido a los altos costos asociados con su instrumentación y por lo pronto no se tratan ya en el Manual de TEEs Básicas. En el resto de esta sección se dan más descripciones y algunos ejemplos de modelos mecánicos y de variables múltiples.

## **4.1 Modelos Mecánicos**

Los modelos mecánicos se basan en ecuaciones que han sido desarrolladas utilizando fundamentos de Química, Física y Biología para describir la tasa de emisión de un tipo de fuente en particular. Entre los emisores importantes de COVs que requieren muchas variables para calcular las emisiones se encuentran las operaciones de almacenamiento y manejo de derivados del petróleo (e. g., tanques de almacenamiento superficiales y subterráneos; carga de carros-tanque, pipas y buques-tanque; y carga de gasolina en las estaciones de servicio).

En el resto de esta sección se presenta información sobre los modelos de la EPA que se han desarrollado para estimar las emisiones de las siguientes categorías de fuente:

- Tanques de almacenamiento
- Operaciones de carga de derivados del petróleo

- Rellenos sanitarios
- Modelos de emisiones al aire de agua y aguas residuales
- Polvos fugitivos.

Para cada categoría de fuente se presenta un breve resumen de las ecuaciones del modelo de emisión, seguida por un resumen de los datos y parámetros requeridos, así como los valores por omisión recomendados en los EU. Se pueden hallar ejemplos de los cálculos para cada modelo en el Apéndice III-A. En los casos en que existe un modelo para computadora que esté disponible se incluye una breve descripción.

Para mayor información acerca de los modelos de la EPA y otras herramientas de estimación de emisiones al aire, comunicarse al:

- CHIEF Bulletin Board System (BBS):  
95-919-541-5742 (marcar por módem)
- Info CHIEF Help Desk  
95-919-541-5285 (teléfono)  
95-919-541-5680 (fax)

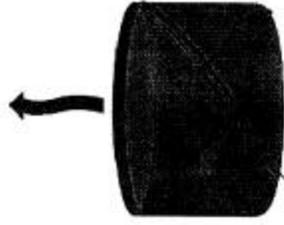
En el Apéndice III-B se pueden hallar copias de los folletos distribuidos por la oficina de asistencia de Info CHIEF (Info CHIEF Help Desk).

### 4.1.1 Tanques de Almacenamiento

Las ecuaciones actuales de modelos de emisión de la EPA para tanques de almacenamiento constituyen los mejores ejemplos de modelos mecánicos. Por ejemplo, en el modelo de tanque de almacenamiento de techo fijo se aplican los principios de transferencia de calor y otros a las pérdidas por respiración en el modelo, como se muestra en la Figura 4-1.

La desventaja de usar el programa TANKS o las ecuaciones del *AP-42*, es que se requieren más recursos para reunir los datos de entrada y para utilizar las ecuaciones o el programa, que si se usaran otras aproximaciones. Si sólo existe una pequeña cantidad de emisiones puede que no valga la pena el esfuerzo extra. Existe el compromiso de desarrollar factores de emisión por omisión específicos para cada región, utilizando las ecuaciones del *AP-42* o el programa TANKS, que reflejen la temperatura promedio, las condiciones de los tanques y los contenidos de sustancias químicas para la región del inventario.

Pérdidas por Respiración  
en un Tanque de Almacenamiento  
de Sustancias Orgánicas



COVs emitidos por la expansión  
y contracción del vapor debidas  
a cambios en la temperatura y presión

$$\text{Emisiones} = f(V_v, W_v, \Delta P_v, P_{va}, \Delta T_v, T_{LA})$$

donde:

$V_v$  = volumen del espacio de vapor en el tanque

$W_v$  = densidad de vapor del líquido almacenado

$\Delta P_v$  = intervalo diario de vapor del líquido almacenado

$P_{va}$  = presión de vapor a la temperatura diaria  
promedio de la superficie del líquido

$P_A$  = presión atmosférica

$\Delta T_v$  = intervalo diario de la temperatura del vapor del  
líquido almacenado

$T_{LA}$  = temperatura promedio diaria de la superficie  
del líquido

Figura 4-1. Ejemplo de Modelado Mecanicista

## Tanques de Techo Fijo

**Ecuaciones de un Modelo de Emisiones** - Los dos tipos de emisiones más significativas de los tanques de almacenamiento de techo fijo son las pérdidas en reposo y las pérdidas en operación. Las primeras consisten en la expulsión de vapor del tanque debidas a la expansión y la contracción del vapor, que son resultado de los cambios en la temperatura y en la presión barométrica. Estas pérdidas se presentan sin ningún cambio en el nivel del tanque.

La pérdida combinada por el llenado y el vaciado se conoce como pérdida en operación. La evaporación durante las operaciones de llenado es resultado de un aumento en el nivel del líquido en el tanque. A medida que el nivel del líquido aumenta, la presión dentro del tanque rebasa la presión de alivio y se expulsan vapores del tanque. La pérdida evaporativa durante el vaciado del líquido se presenta cuando el aire arrastrado hacia el tanque durante la remoción del líquido se satura con vapores orgánicos y se expande, excediendo así la capacidad del espacio de vapor.

Las emisiones de los tanques de techo fijo varían en función de la capacidad del contenedor, la presión de vapor del líquido almacenado, la tasa de utilización del tanque y las condiciones atmosféricas el lugar donde se encuentra el tanque. A continuación se resumen las ecuaciones del modelo de emisión. Las ecuaciones detalladas pueden encontrarse en el *AP-42, Sección 7.1* (U.S. EPA, 1995a). Los parámetros requeridos y los valores por omisión para los EU se presentan en la Tabla 4-1.

Las pérdidas totales de emisión en los tanques de techo fijo son definidas como:

$$L_T = L_S + L_W \quad (4-1)$$

donde:

$L_T$  = pérdidas totales, lb/año  
 $L_S$  = pérdidas en el almacenamiento en reposo, lb/año  
 $L_W$  = pérdidas en operación, lb/año.

**Pérdidas en reposo (respiración):**

$$L_S = 365 V_V W_V K_E K_S \quad (4-2)$$

donde:

$V_V$  = volumen del espacio de vapor,  $\text{ft}^3$   
 $W_V$  = densidad del vapor,  $\text{lb}/\text{ft}^3$   
 $K_E$  = factor de expansión del espacio del vapor, adimensional  
 $K_S$  = factor de saturación del vapor venteado, adimensional.

**Pérdida en Operación:**

$$L_W = 0.0010 M_V P_{VA} Q K_N K_P \quad (4-3)$$

donde:

$M_V$  = peso molecular del vapor, lb/lb-mol  
 $P_{VA}$  = presión del vapor a la temperatura promedio diaria del líquido, lb/pulg<sup>2</sup> absoluta  
 $Q$  = producción neta anual, bbl/año  
 $K_N$  = factor de producción, adimensional  
 $K_P$  = factor de pérdida de producto en la operación, adimensional.  
 (0.75 para petróleos crudos, 1.0 para los demás líquidos orgánicos)

**Tabla 4-1**  
**Tanques de Techo Fijo**  
**Parámetros Requeridos y Valores Estadounidenses por Omisión**

Descripción del Parámetro	Variable	Valor por Omisión para EU
Diámetro del tanque	D	
Altura de la envolvente del tanque	H <sub>S</sub>	
Altura del líquido en el tanque	H <sub>L</sub>	
Pendiente del techo cónico del tanque	S <sub>R</sub>	0.0625
Radio del techo de domo del tanque	R <sub>R</sub>	Diámetro del Tanque (D)
Capacidad del tanque	V <sub>LX</sub>	
Color de la pintura del tanque	Se utiliza para determinar $\alpha$	
Condición de la pintura del tanque	Se utiliza para determinar $\alpha$	
Absorción solar de la pintura del tanque	$\alpha$	0.17 (i. e., pintura blanca en buenas condiciones)
Arreglo de la presión en el respiradero del tanque	P <sub>BP</sub>	0.03 psig
Arreglo del vacío en el respiradero del tanque	P <sub>BV</sub>	-0.03 psig
Gasto del Material	Q	
Peso molecular del vapor del material	M <sub>V</sub>	Se dan los valores del peso molecular para productos petroquímicos selectos
Presión de vapor del material a las temperaturas promedio máxima y mínima de la superficie del líquido	P <sub>VA</sub> , P <sub>VX</sub> , y P <sub>VN</sub> a T <sub>LA</sub> , T <sub>LX</sub> , y T <sub>LN</sub>	Se dan los valores de la presión de vapor productos petroquímicos selectos. Las correlaciones de la presión de vapor basadas en la RVP y S están disponibles para petróleos crudos y productos refinados de petróleo.
Presión de vapor Reid del material	RVP	Valores proporcionados para productos refinados de petróleo selectos
Pendiente de destilación del material	S	Valores proporcionados para productos refinados de petróleo selectos
Temperaturas ambiente locales diarias, máxima y mínima	T <sub>AX</sub> y T <sub>AN</sub>	Valores proporcionados para diversas localidades de EU
Factor de insolación total en la localidad	I	Valores proporcionados para diversas localidades de EU

## Tanques de Techo Flotante

**Ecuaciones del Modelo de Emisiones** - Las emisiones totales de los tanques de techo flotante son la suma de las pérdidas al extraer material y las pérdidas en el almacenamiento en reposo. Las pérdidas por extracción ocurren cuando baja el nivel del líquido y, por lo tanto, baja el nivel del techo flotante. Algo del líquido queda adherido a la superficie del tanque y es expuesto a la atmósfera. Existen pérdidas evaporativas hasta que el tanque esté lleno y la superficie expuesta quede cubierta nuevamente con el líquido. En los tanques de techo flotante interno, con techos fijos soportados por columnas, algún líquido también se cuelga de éstas.

Las pérdidas en el almacenamiento en reposo de estos tanques incluyen las pérdidas en la orilla del sello y las del ajuste del techo. Todas éstas pueden presentarse a través de muchos mecanismos complejos tales como la pérdida inducida por el viento; la pérdida por respiración debida a cambios de temperatura y presión; la pérdida por la permeación del material del sello; o la pérdida por el efecto de capilaridad del líquido. Para los tanques de techo flotante interno, las pérdidas en reposo también pueden incluir aquellas ocasionadas por las juntas en la plataforma, al grado en que éstas no sean completamente herméticas.

A continuación se resumen las ecuaciones del modelo de emisiones. Las ecuaciones detalladas, las tablas de datos de apoyo y las figuras pueden encontrarse en el *AP-42, Sección 7.1* (U.S. EPA, Febrero 1996). Los datos de los parámetros requeridos y los valores por omisión para los EU se presentan en la Tabla 4-2.

Las pérdidas totales por emisión de los tanques con techo flotante se definen como:

$$L_T = L_R + L_{WD} + L_F + L_D \quad (4-4)$$

donde:

$L_T$  = pérdidas totales, lb/año;  
 $L_R$  = pérdidas en la orilla del sello, lb/año;  
 $L_{WD}$  = pérdidas al extraer material del tanque, lb/año;  
 $L_F$  = pérdidas en el ajuste de la plataforma, lb/año  
 $L_D$  = pérdidas en la junta de la plataforma, lb/año.

**Pérdidas en la orilla del sello ( $L_R$ ):**

$$L_r = (K_{Ra} + K_{Rb} \times v^n) \times \frac{P_{VA}/14.7}{[1 + (1 - P_{va}/14.7)^{0.5}]^2} \times D \times M_v \times K_c \quad (4-5)$$

(Nota: el término  $v^n$  se usa solamente para los tanques con techo flotante externo).

**Pérdidas al extraer material del tanque ( $L_{WD}$ ):**

$$L_{WD} = \frac{0.943 \times Q \times C \times W_L}{D} \times \frac{(1 + N_c \times F_c)}{D} \quad (4-6)$$

**Pérdida en el ajuste de la plataforma ( $L_F$ ):**

$$L_F = F_F \times \frac{P_{VA}/14.7}{[1 + (1 - P_{va}/14.7)^{0.5}]^2} \times M_v \times K_c \quad (4-7)$$

**Pérdida en la junta de la plataforma ( $L_D$ ):**

$$L_D = (K_D + S_D \times D^2) \times \frac{P_{VA}/14.7}{[1 + (1 - P_{va}/14.7)^{0.5}]^2} \times M_v \times K_c \quad (4-8)$$

donde:

$K_{Ra}$  = factor de pérdida en la orilla del sello a velocidad del viento igual a cero, lb-mol/pie.año  
 $K_{Rb}$  = factor de pérdida en la orilla del sello dependiente de la velocidad del viento, lb-mol/(mph)<sup>n</sup>  
 pie.año  
 $v$  = velocidad promedio del viento en el sitio del tanque, mph;  
 $n$  = exponente de la velocidad del viento relacionado con el sello  
 $P_{VA}$  = presión de vapor verdadera a la temperatura diaria promedio de la superficie, psia  
 $D$  = diámetro del tanque, ft  
 $M_v$  = peso molecular del vapor del líquido, lb/lb-mol  
 $K_c$  = factor del producto (0.4 para aceites crudos, 1.0 para todos los demás líquidos orgánicos)

Q=	producción, bbl/año;
C=	factor de adherencia, bbl/1000 ft <sup>2</sup> ;
W <sub>L</sub> =	densidad del líquido, lb/gal;
N <sub>c</sub> =	número de columnas
F <sub>c</sub> =	diámetro efectivo de la columna, ft
F <sub>F</sub> =	factor de pérdida del ajuste entre el techo y la plataforma, lb-mol/año
K <sub>D</sub> =	factor de pérdida en la junta de la plataforma por unidad de longitud de la junta, lb-mol/ft año
(0.34	para junta atornillada, 0.0 para junta soldada)
S <sub>D</sub> =	factor de longitud de la junta de la plataforma, ft/ft <sup>2</sup> .

**Tabla 4-2**  
**Tanques con Techo Flotante**  
**Parámetros Requeridos y Valores por Omisión para los EU**

Descripción del Parámetro	Variable	Valor Estadounidense por Omisión
Diámetro del tanque	D	
Número de columnas del tanque	N <sub>C</sub>	Ver tabla basada en el diámetro del tanque (D).
Diámetro efectivo de la columna del tanque	F <sub>C</sub>	1.0 pie
Condición de la envolvente del tanque	Se usa para determinar C (herrumbre ligera, herrumbre densa, recubrimiento de mortero lanzado)	
Factor de adherencia del tanque	C	
Velocidad del viento el lugar donde se halla el tanque	v (también se usa para determinar F <sub>F</sub> )	Se dan valores para varios lugares de EU
Construcción del tanque (soldado o remachado)	Se usa para determinar K <sub>RA</sub> , K <sub>RB</sub> , y n	
Construcción de la plataforma del tanque	Utilizado para determinar K <sub>D</sub> (soldado o atornillado) y S <sub>D</sub> (tamaño de las láminas o paneles)	
Factor de pérdida en el ajuste de la plataforma del tanque	F <sub>F</sub>	Se puede calcular contando el número de uniones de la plataforma de un tanque específico
Sistema de sellado del tanque (tipos de sellos primarios o secundarios)	Se usan para determinar K <sub>RA</sub> , K <sub>RB</sub> , y n	

## Tabla 4-2

### Tanques con Techo Flotante Parámetros Requeridos y Valores por Omisión para los EU

Descripción del Parámetro	Variable	Valor Estadounidense por Omisión
Factores del sello del tanque (y exponente de velocidad del viento relacionado con el sello)	$K_{Ra}, K_{Rb}, n$	Para los techos externos, usar valores para soldado, ajuste promedio, sello primario del pilote. Para internos, usar valores para ajuste promedio y sellos primarios montados en vapor, solamente.
Factor de longitud de la unión de la plataforma del tanque	$S_D$	$S_D=0.2$ para plataformas remachadas, 0.0 para plataformas soldadas
Producción de material	$Q$	
Peso molecular del vapor del material	$M_V$	Se dan valores del peso molecular para productos petroquímicos selectos
Presión de vapor del material a la temperatura promedio de la superficie del líquido	$P_{VA}$ a $T_{LA}$	Se dan valores de la presión de vapor para productos petroquímicos selectos. Las correlaciones de la presión de vapor están basadas en la RVP y S disponibles para petróleos crudos y productos refinados de petróleo
Densidad del líquido del material	$W_L$	Se dan valores para productos petroquímicos selectos

#### Modelo de la EPA para Computadora

El programa TANKS está diseñado para estimar las emisiones de COVs de tanques de almacenamiento. El usuario da la información específica sobre el tanque y su contenido, y el programa estima las emisiones anuales o estacionales y genera un reporte. Las emisiones se pueden dividir en pérdidas de respiración y

pérdidas por operación (U.S. EPA, 1996).

El programa TANKS tiene una base de datos sobre productos químicos para más de 100 líquidos orgánicos, y datos meteorológicos de más de 250 ciudades en EU. El usuario puede añadir nuevas sustancias y ciudades (con datos meteorológicos) a su propia versión de la base de datos. Los estilos de tanque presentados en el programa incluyen tanques de techo fijo, tanto verticales como horizontales, y tanques de techo flotante tanto interno como externo. El tanque puede contener uno o múltiples componentes líquidos.

Ya está disponible la versión 3.0 del programa. Las ecuaciones para estimar emisiones que forman la base del software fueron desarrolladas por el American Petroleum Institute (API) (*Instituto Americano del Petróleo*). El API conserva el derecho de autor de estas ecuaciones, pero dio el permiso para la distribución no exclusiva y no comercial de este material para las agencias gubernamentales y regulatorias. Sin embargo, se reserva los derechos con respecto a toda duplicación y distribución comercial de su material. Por lo tanto, el programa TANKS está disponible para uso público, pero no puede ser vendido sin el permiso del API por escrito.

El TANKS 3.0 se escribió en FoxPro2.5™, un lenguaje compatible con d-Base, y es distribuido por la EPA a través del CHIEF BBS, o por vía postal en diskettes. El programa TANKS 3.0 puede requerir revisiones y modificaciones para asegurar su consistencia con la metodología para el cálculo de emisiones de la EPA. Este organismo da la bienvenida a la retroalimentación de los usuarios para el programa, para identificar las limitaciones y sugerir cambios que se incorporen en las futuras versiones del TANKS.

#### **4.1.2 Operaciones de Carga de Productos Derivados del Petróleo**

#### **4.1.2 Petroleum Product Loading Operations**

#### **4.1.2 Petroleum Product Loading Operations**

#### **4.1.2 Petroleum Product Loading Operations**

donde: S = factor de saturación (basado en el método de llenado y de servicio)  
P = presión de vapor verdadera del líquido cargado, psia;  
M<sub>v</sub> = peso molecular de los vapores, lb/lb-mol  
T = temperatura de la masa de líquido cargado, °R.

Las pérdidas en la carga son la fuente más importante de emisiones evaporativas de derivados del petróleo de carros-tanque, pipas y buques-tanque. Las pérdidas en la carga se presentan cuando los vapores orgánicos en los tanques de carga “vacíos” son desplazados a la atmósfera por el líquido que está siendo introducido.

**Ecuaciones del Modelo de Emisión** - A continuación se presentan las ecuaciones del modelo de emisión. Es posible encontrar información más detallada en el *AP-42, Sección 4.4* (U.S. EPA, 1995a). Los parámetros requeridos y los valores por omisión para EU se presentan en la Tabla 4-3.

**Tabla 4-3**

**Operaciones de Carga  
Parámetros Requeridos y Valores por Omisión para EU**

Descripción del Parámetro	Variable	Valor por Omisión para EU
Método de llenado	Se usa para determinar S (salpicado o sumergido)	
Servicio de carga	Se usa para determinar S (limpio, normal dedicado o con balance de vapor dedicado)	
Producción de material	Q	

Factor de saturación del material	S	Ver tabla basada en el método de llenado y de servicio
-----------------------------------	---	--

**Tabla 4-3 (Continuación)**

**Operaciones de Carga  
Parámetros Requeridos y Valores por Omisión para EU**

Descripción del Parámetro	Variable	Valor Estadounidense por Omisión
Peso molecular del vapor del material	$M_v$	En el AP-42, Sección 7.1 se dan pesos moleculares para productos petroquímicos selectos.
Presión de vapor del material a la temperatura promedio de la superficie del líquido	P	En el AP-42, Sección 7.1 se dan valores de presiones de vapor para petroquímicos selectos. También están disponibles correlaciones de la presión de vapor con base en RVP y S están disponibles para petróleos crudos y productos refinados de petróleo.
Temperatura de la masa del material durante la carga	T	

**Modelo de Computadora de la EPA**

Dada la simplicidad de la ecuación de este modelo, actualmente no hay disponible ningún modelo de computadora.

**4.1.3 Rellenos Sanitarios**

Los componentes principales del gas de los rellenos sanitarios son el metano y el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), y son producidos por microorganismos dentro del relleno en condiciones anaerobias. Aunque las concentraciones de contaminantes tóxicos son muy pequeñas, por lo general los volúmenes de las emisiones de gases en

los rellenos sanitarios pueden ser muy grandes, por lo que a menudo se les incluye en los inventarios de emisiones tóxicas al aire. La tasa de emisiones de un relleno sanitario está determinada por los mecanismos de producción de gas y los de transporte. Los primeros incluyen la producción del componente de la emisión en su fase vapor, a través de la vaporización, descomposición biológica o reacción química. Los mecanismos de transporte incluyen el transporte de un componente volátil en su fase vapor a la superficie del relleno sanitario, el transporte a través de la capa de aire sobre el relleno y hacia dentro de la atmósfera.

### Ecuaciones del Modelo de Emisión

En un relleno sanitario en particular, se pueden estimar las emisiones no controladas de metano utilizando el modelo cinético teórico de primer orden de producción de metano desarrollado por la EPA, mismo que se presenta a continuación. Se puede hallar información más detallada en el *AP-42, Sección 2.7* (U.S. EPA, 1995a). Los parámetros requeridos y los valores por omisión para EU se presentan en la Tabla 4-4.

$Q_{CH_4} = L_o \times R \times (e^{-kc} - e^{-kt})$		(4-11)
donde:	$Q_{CH_4}$	= tasa de generación de metano en el tiempo t, m <sup>3</sup> /año
	$L_o$	= potencial de generación de metano, m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /Mq de residuos
	$R$	= tasa promedio anual de aceptación de desperdicios durante la vida activa, Mg/año
	$e$	= base de los logaritmos naturales, adimensional
	$k$	= constante de la tasa de generación de metano, año <sup>-1</sup>
	$c$	= tiempo transcurrido desde el cierre del relleno, años (c=0 para rellenos activos)
	$t$	= tiempo transcurrido desde la colocación inicial de residuos, años.

Tabla 4-4

**Rellenos Sanitarios**  
**Parámetros Requeridos y Valores por Omisión para EU**

Descripción del Parámetro	Variable	Valor por Omisión para EU
Potencial de generación de metano	$L_0$	8120 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /Mg residuos. Basado en el percentil 80 del intervalo de valores de la literatura (i.e., 200-9540 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /Mg desperdicios)
Tasa anual promedio de aceptación de residuos durante la vida activa	R	
Constante de la tasa de generación de metano	k	0.02 año <sup>-1</sup> . Basado en el valor por omisión de la Norma de Desempeño de Fuentes Nuevas ( <i>New Source Performance Standard, NSPS</i> ).
Tiempo transcurrido desde el cierre del relleno	c	
Tiempo transcurrido desde la colocación inicial de residuos	t	

**Modelo para Computadora de la EPA**

El Modelo de Emisiones al Aire de Rellenos Sanitarios y Estimación (LAEEM, por sus siglas en inglés) es un programa de computadora diseñado específicamente para monitorear las emisiones en estos sitios. El sistema permite al usuario introducir información específica sobre las características y capacidad de un relleno sanitario individual, y proyectar las emisiones de metano, CO, compuestos orgánicos no metano, y contaminantes peligrosos del aire individuales (CPAs) con el tiempo, utilizando el modelo de decaimiento de Scholl Canyon para la estimación de la producción de gas de rellenos sanitarios. Este modelo es una ecuación de decaimiento de primer orden que usa las características específicas del sitio para

estimar la tasa de generación de gas. En ausencia de datos específicos del sitio, el programa proporciona valores conservadores por omisión, los cuales se presentan en la Tabla 4-4. El usuario también puede diseñar las características de la tasa de decaimiento en base individual. Se proporciona un calculador integrado de la constante de la tasa de decaimiento para los rellenos sanitarios que puedan estar operando un sistema de recuperación de gas para permitir una evaluación más exacta de los atributos del decaimiento. Los resultados se pueden revisar de forma tabular o gráfica. También se incluye un sistema de ayuda con información sobre la operación del modelo, así como detalles sobre las suposiciones y valores por omisión que utiliza el sistema.

El modelo es compatible con IBM<sup>TM</sup>-PC y requiere cuando menos 512 kilobytes (Kb) de memoria, y puede ser utilizado con un adaptador de gráficos monocromático o de color. Se recomienda leer el manual del usuario antes de utilizarlo.

#### **4.1.4 Modelos de Emisiones de Residuos y Aguas Residuales al Aire**

La Oficina de Planeación de la Calidad del Aire y Estándares (OAQPS, por sus siglas en inglés) de la EPA ha desarrollado modelos de emisiones al aire para las plantas dedicadas al tratamiento, almacenamiento y disposición de residuos peligrosos (ETADs).

Los COVs en represas superficiales, plantas de tratamiento de suelos, rellenos sanitarios, pilas de residuos, o sistemas de recolección y tratamiento de aguas residuales, pueden escapar al ambiente desde los residuos y aguas residuales a través de una gran variedad de trayectorias. Para poder estimar de manera razonable la desaparición de compuestos orgánicos, se debe saber qué trayectorias predominan para una sustancia dada, cuál es el tipo de sitio y se debe tener un conjunto de condiciones meteorológicas. La Tabla 4-5 resume la importancia relativa de nueve rutas para los modelos de emisión desarrollados para las diversas fuentes de emisión de residuos peligrosos (U.S. EPA, 1994).

Tabla 4-5

<sup>a</sup>

**Rutas para las Fuentes de Area de Emisiones de Residuos Peligrosos**

Ruta	Embalses Superficiales	Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales		Tratamiento de Suelos	Relleno Sanitario
		Aereadas	No Aereadas		
Volatilización	I	I	I	I	I
Biodegradación	I	I	I	I	S
Fotodescomposición	S	D	D	D	D
Hidrólisis	S	S	S	D	D
Oxidación y reducción	D	D	D	D	D
Adsorción	D	S	S	D	D
Reacción de radical hidroxilo	D	D	D	D	D
Migración <sup>b</sup>	D	D	D	D	D
Escurrimiento <sup>b</sup>	D	D	D	D	D

I = Importante

S = Secundario

D = Despreciable o no aplicable

<sup>a</sup> Algunos compuestos individuales en un tipo de sitio determinado pueden tener rutas dominantes diferentes a las que se muestran aquí.

<sup>b</sup> Se considera que la migración de agua y los escurrimientos tienen efectos despreciables sobre el suelo y sobre las aguas superficiales en una planta autorizada para el manejo de residuos peligrosos, que esté localizada, operada y mantenida de manera adecuada.

Fuente: U.S. EPA, 1994.

### Ecuaciones del Modelo de Emisión

Se considera que una ruta es cualquier proceso que remueva los VOCs de un sitio. Esta remoción puede ser física (e. g., la volatilización de un solvente de un embalse superficial), o química (e. g., la oxidación de un alcohol en una planta de tratamiento de aguas residuales). Las rutas pueden ser consideradas como procesos donde la tasa, con frecuencia, es altamente dependiente de la concentración de la especie que desaparece y la temperatura del sistema.

A continuación se define brevemente cada una de las rutas. Sin embargo, las ecuaciones del modelo de emisión desarrolladas para describir estas trayectorias son sumamente complejas. Una discusión detallada de estas ecuaciones, así como ejemplos de cálculos para cada ruta pueden encontrarse en el documento *Air Emissions Models For Waste and Wastewater (EPA-453/R-94-080A)* (U.S. EPA, 1994), disponible en el la oficina del CHIEF.

- **Volatilización:** se presenta cuando las moléculas de una sustancia disuelta escapan a una fase gaseosa adyacente.
- **Adsorción:** tiene lugar cuando las moléculas de una sustancia disuelta (en un sistema líquido-sólido) se adhieren físicamente a los elementos de la fase sólida. También puede haber enlace químico (quimisorción)
- **Migración:** ocurre cuando las sustancias aplicadas a los suelos son transportadas a través de éstos hacia el agua subterránea.
- **Escurrimiento:** se presenta cuando las sustancias químicas en el suelo o cerca de él pueden ser deslavadas por la lluvia.
- **Descomposición biológica:** tiene lugar cuando los microbios fraccionan los compuestos orgánicos para sus procesos metabólicos.
- **Descomposición fotoquímica:** puede ocurrir cuando una sustancia química absorbe luz y reacciona (fotólisis directa), o cuando la sustancia reacciona debido a que los elementos que la rodean absorben la luz (fotólisis indirecta).
- **Oxidación y reducción:** los compuestos orgánicos que se encuentran en los sistemas acuáticos pueden ser oxidados por el oxígeno (sobre todo como un solo oxígeno, O<sub>2</sub>) u otros oxidantes tales como los radicales hidroxilo (OH) y los radicales peroxi (RO<sub>2</sub>). En medios anaeróbicos pueden presentarse reacciones de reducción.
- **Hidrólisis:** se presenta cuando una sustancia reacciona con el agua.
- **Reacciones de radical hidroxilo:** éstas puede ocurrir por la adición de un radical hidroxilo, por la sustracción de un átomo de hidrógeno, o por ambos mecanismos.

### Parámetros requeridos

Para cada modelo de emisiones de residuos y de aguas residuales se requieren diferentes parámetros. La Tabla 4-6 proporciona algunos ejemplos de los datos necesarios para soportar estos modelos de emisión.

**Tabla 4-6**  
**Modelos de Residuos y de Aguas Residuales**  
**Parámetros Requeridos**

Parámetro	Unidades
Relación entre el área del residuo y el área del flujo de aire en el drenaje	Adimensional
Fracción de compuestos orgánicos que entran y se pierden en la atmósfera	Adimensional
Coefficiente de reparto	Fracción molar de gas por fracción molar de líquido
Longitud del conducto de recolección	m
Longitud del drenaje	m
Tasa de la corriente subálvea	m <sup>3</sup> /s
Diámetro del drenaje	m
Radio del conducto de la corriente subálvea	m
Profundidad del líquido en la corriente subálvea	m
Velocidad del viento	m/s
Humedad relativa	Porcentaje
Temperatura del sistema de recolección	°C
Area transversal de los orificios de venteo	cm <sup>2</sup>
Altura de la cubierta de la boca de acceso sobre la superficie	m

### Modelo para Computadora de la EPA

**CHEMDAT8**—CHEMDAT8 es una hoja de cálculo Lotus 123® elaborada por la División de Normas de Emisión de la EPA que incluye modelos analíticos para la estimación de COVs en procesos de plantas, etc. El modelo original incluye embalses de disposición, rellenos sanitarios cerrados, plantas de tratamiento de suelos y procesos de aereación y no aereación en estanques. Las emisiones previstas se pueden ver en pantalla o imprimirse. También está disponible una presentación gráfica de las relaciones entre la predicción de las emisiones, tanto con la presión de vapor, como con el coeficiente de reparto. Los diagramas de dispersión resultantes pueden imprimirse con PrintGraph®, que es otro programa de Lotus®.

Los modelos en CHEMDAT8 pueden aplicarse en otros tipos de proceso de tratamiento, etc., además de los contenidos en el diseño original. El modelo de estanque no aereado puede estimar las emisiones de estanques superficiales de almacenamiento y de tanques abiertos de tratamiento de aguas residuales. El modelo de CHEMDAT8 para predecir emisiones de estanques superficiales de tratamiento y tanques de tratamiento de aguas residuales es el modelo de estanque aereado. El modelo de tratamiento de suelos de CHEMDAT8 puede estimar las emisiones de suelos de tratamiento terrestre, tiraderos de cielo abierto y de pilas de residuos. Las emisiones de la superficie de una película de aceite en una planta de tratamiento de suelos, o de una película de aceite en estanques superficiales pueden predecirse con el modelo de película de aceite de CHEMDAT8. Cuando no está disponible un modelo de CHEMDAT8 para predecir emisiones, se pueden hacer cálculos manuales de las emisiones usando las ecuaciones mostradas en los reportes, mismas que constituyen los antecedentes del modelo.

**Esta octava versión de la hoja de cálculo CHEMDAT contiene varias modificaciones operativas importantes. Con CHEMDAT8 el usuario puede seleccionar como blanco un subconjunto de compuestos para investigación. También puede especificar qué**

procesos de las plantas de tratamiento, etc., se deben considerar durante una sesión. Estas dos selecciones mejoran la eficiencia del programa con relación a algunas de las primeras versiones, haciendo mínimos los requerimientos de almacenamiento, así como el tiempo real de carga y ejecución.

Los parámetros de entrada por omisión en el disquete de CHEMDAT8 demuestran algunos cálculos como ejemplo. Sin embargo, los parámetros de entrada pueden cambiarse para reflejar diferentes características de las plantas y, después recalcular las emisiones conforme a estas condiciones modificadas. Más aún, la lista de 60 compuestos que ya están en el CHEMDAT8 puede incrementarse hasta casi 700 sustancias. Los procedimientos para introducir los datos de compuestos adicionales en el CHEMDAT8 se describen en el reporte de apoyo.

## **WATER8**

WATER8 es un programa de computadora manejado con menús, que tiene el objetivo de estimar emisiones solamente de sistemas de tratamiento de aguas residuales. WATER8 usa algunos de los mismos modelos que se encuentran en CHEMDAT8, pero contiene datos para un total de 800 compuestos. Este programa también tiene mejoras gráficas para ayudar al usuario a visualizar el sistema que está siendo modelado.

### **4.1.5 Polvos Fugitivos**

El polvo atmosférico significativo surge de perturbaciones mecánicas del material granulado expuesto al aire. El polvo generado por estas fuentes abiertas se denomina “fugitivo” debido a que no se descarga a la atmósfera en una corriente de flujo confinado. Las fuentes de polvos fugitivos más comunes incluyen caminos pavimentados y no pavimentados, operaciones agrícolas, pilas de almacenamiento de agregados y operaciones de construcción pesada. La generación del polvo se debe a la pulverización y abrasión de los materiales de la superficie al aplicar una fuerza mecánica a través de diversos implementos (i. e., ruedas, cuchillas, etc.), y por el arrastre de partículas de polvo por la acción de corrientes turbulentas de aire, tales como la erosión eólica de una superficie expuesta a vientos con velocidades superiores a los 19 km/hr (12 millas/hr).

La EPA ha desarrollado varias ecuaciones de modelos de emisión, para estimar las emisiones de estas fuentes de polvos fugitivos. Puede encontrarse información más detallada en el *AP-42, Sección 13.2* (U.S. EPA, 1995a).

**Ecuaciones del Modelo de Emisión** - A continuación se presentan ejemplos de ecuaciones del modelo de emisión. Información más detallada puede encontrarse en el *AP-42, Sección 13.2.1* (U.S. EPA, 1995a). Los datos de los parámetros requeridos y los valores por omisión para los EU se presentan en la Tabla 4-7.

### Caminos Sin Pavimentar

(4-12)

$$E = VKT \times EF$$

donde:

E = tasa de emisión promedio anual como masa, kg/año

VKT = kilómetros recorridos por el vehículo, VKT/año

EF = factor de emisión, kg/VKT

(4-13)

$$EF = k (1.7) \left( \frac{s}{12} \right) \left( \frac{S}{24} \right) \left( \frac{W}{2.7} \right)^{0.7} \left( \frac{w}{4} \right)^{0.5} \left( \frac{365-p}{365} \right) \text{ (kg/VKT)}$$

donde:

k = multiplicador del tamaño de partícula, adimensional

s = contenido de sedimentos del material de recubrimiento del camino, %

S = velocidad promedio del vehículo, km/hr

W = peso medio del vehículo, Mg

w = número medio de ruedas

p = número de días al año con una precipitación mínima de 0.254 mm (0.01

in).

**Caminos Pavimentados**

(4-14)

$$E = VKT \times EF$$

donde: E = tasa de emisión anual promedio en masa, g/año;  
 VKT = vehículo kilómetros recorridos, VKT/año;  
 EF = factor de emisión, g/VKT.

(4-15)

$$EF = k \left( \frac{sL}{2} \right)^{0.65} \left( \frac{W}{3} \right)^{1.5}$$

donde: k = factor de emisión de base para el intervalo de tamaño de partícula (g/VKT)  
 sL = carga de sedimentos de la superficie del camino (g/m<sup>2</sup>)  
 W = peso promedio (tons) de los vehículos que transitan por el camino

**Operaciones de Construcción Pesada**

(4-16)

$$E = A \times T \times EF$$

donde: E = tasa de emisión anual promedio en masa, Mg/año  
 A = área en construcción, hectáreas  
 T = tiempo de construcción, meses  
 EF = factor de emisión = 2.69 Mg/hectárea/mes

**Manejo de Agregados y Pilas de Almacenamiento**

(4-17)

$$E = Q \times EF$$

donde: E = tasa de emisión anual promedio en masa, kg/año  
 Q = cantidad de material transferido, Mg/año  
 EF = factor de emisión, kg/Mg

$$EF = k(0.0016) \frac{\left(\frac{U}{2.2}\right)^{1.3}}{\left(\frac{M}{2}\right)^{1.4}} \quad (4-18)$$

donde: k = multiplicador del tamaño de partícula, adimensional  
 U = velocidad media del viento, m/s  
 M = contenido de humedad del material, %

**Erosión Eólica Industrial**

(4-19)

$$E = A \times EF$$

donde: E = tasa de emisión anual promedio de masa, g/año  
 A = área de la superficie del material sujeto a la perturbación, m<sup>2</sup>  
 EF = factor de emisión, g/m<sup>2</sup>/año

(4-20)

$$EF = k \sum_{i=1}^N P_i$$

donde: k = multiplicador del tamaño de partícula, adimensional  
 N = número de perturbaciones por año  
 P<sub>i</sub> = potencial de erosión correspondiente a la milla más rápida de viento  
 para el periodo (i)ésimo entre perturbaciones g/m<sup>2</sup>

## Tabla 4-7

### Polvos Fugitivos Parámetros Requeridos y Valores por Omisión para EU

Descripción del Parámetro	Variable	Valor por Omisión para EU
Tamaño de partícula para el que se estimarán las emisiones	Se usa para determinar k	
Multiplicador del tamaño de partícula	k	
Contenido de sedimento del material de la superficie del camino	s	Tabla de valores por omisión presentada industria y por el uso del camino y material de la superficie
Velocidad media del vehículo	S	Intervalo de valores en condiciones de prueba: 21-64 km/hr.
Peso medio del vehículo	W	Intervalo de valores en condiciones de prueba: 2.7-142 Mg.
Número medio de ruedas	w	Intervalo de valores en condiciones de prueba 4-13 ruedas
Número de días por año con precipitación mínima de 0.254 mm (0.01 in)	p	Se dan datos regionales para EU
Carga de sedimentos en la superficie del camino	sL	Se presenta tabla de valores por estado y ciudad de EU
Area superficial del material	A	
Tiempo de construcción	T	
Cantidad de material transferido	Q	
Velocidad media del viento	U	
Contenido de humedad del material	M	Se presenta tabla de valores presentados por industria y material de la superficie
Número de perturbaciones por año	N	
Función del potencial de erosión	P <sub>i</sub>	

## Modelo para Computadora de la EPA

En 1990, la EPA desarrolló dos programas para ayudar a estimar las emisiones de polvos fugitivos causados por las perturbaciones mecánicas (i. e., caminos pavimentados y no pavimentados, manejo de materiales, actividades agrícola, y construcción y demolición), y por erosión eólica. Estos programas para computadora se basan en el material presentado en el documento *Control of Open Fugitive Dust Sources* (Control de Fuentes Abiertas de Polvos Fugitivos) (U.S. EPA, 1988). La sección de ayuda da definiciones para los términos con los cuales el usuario pudiera no estar familiarizado. Además, se dan valores por omisión, típicos o sugeridos para ciertas variables. Por ejemplo, el número de días con precipitación pluvial significativa para más de 175 ciudades de EU, así como la velocidad media anual del viento para más de 120 ciudades de EU.

La EPA distribuye los programas para polvos fugitivos a través del CHIEF BBS o en disquete por correo. Para mayor información, puede leerse *The User's Manual for the PM<sub>10</sub> Open Fugitive Dust Source Computer Model Package* (Manual del Usuario del Modelo de Computadora para PM<sub>10</sub> de Fuentes Abiertas de Polvos Fugitivos) (U.S. EPA, 1990).

Debido a que estos programas no han sido actualizados desde 1990, no son tan amigables con el usuario como el software desarrollado más recientemente. En muchos casos, probablemente sería más eficiente que los usuarios desarrollaran sus propias hojas de cálculo con las ecuaciones del modelo de emisiones. Como otra opción puede usarse el modelo PART5 para fuentes móviles para estimar las emisiones de polvos fugitivos de caminos pavimentados y sin pavimentar.

## **4.2 Modelos de Emisiones de Variable Múltiple**

Un modelo de emisiones de variable múltiple es una metodología híbrida que combina varios enfoques tradicionales de inventarios con información específica del sitio dentro de un marco de extrapolación. Como su nombre sugiere, un modelo de variable múltiple expresa las estimaciones de las emisiones en términos de un conjunto de variables que ayudan a caracterizar el sistema que se modela. Este enfoque es adecuado en particular, para las regiones que tienen registros y estadísticas que resultan limitados para la aplicación de otras técnicas tradicionales de inventario. El concepto fundamental está en el desarrollo de estimaciones de emisión basadas en las características del uso y cobertura del suelo. Por ejemplo, los lugares agrícolas, residenciales, comerciales e industriales tienen diferentes características, en sus emisiones. Estas diferencias pueden ser caracterizadas utilizando diversas variables que describan la actividad que produce emisiones para cada tipo de y de cobertura del suelo.

Aunque es probable que el uso de modelos de variable múltiple tenga costos iniciales más elevados que el de otros métodos de inventario debido al paso correspondiente al desarrollo del modelo mismo, la facilidad de aplicación y la posible reducción de costos de mantenimiento del inventario en el futuro lo hacen una opción atractiva. Otra ventaja significativa de los modelos de variable múltiple es que se basan en datos locales. Esto permite que los efectos de las condiciones locales sean incluidos en las estimaciones de las emisiones. Entre los posibles tipos de fuente que podrían ser evaluados con estos modelos en México se encuentran las actividades de construcción las agrícolas, así como el uso de solventes. El enfoque general para desarrollar un modelo de variable múltiple de emisiones se describe en la sección 4.2.1, y se presenta un ejemplo conceptual en la sección 4.2.2.

### **4.2.1 Desarrollo de un Modelo de Emisiones de Variable Múltiple de Emisiones**

El primer paso en el desarrollo de un modelo de emisiones de variable múltiple es la identificación de las variables que caracterizan el sistema global que se pretende cubrir. Estas variables diferirán de un sistema a otro. Usando las actividades agrícolas como ejemplo, estas variables podrían ser un tipo de cultivo (legumbres, hortalizas, etc.), superficie cultivada o tamaño de la cosecha. Para las actividades de construcción, las variables podrían ser el tipo de construcción (edificios, carreteras, vías de ferrocarril, etc.), el tamaño de la misma o su costo. Cada una de estas variables puede usarse para describir la magnitud de las emisiones de estas fuentes. Por ejemplo, la construcción de dos kilómetros de carretera generaría más emisiones de partículas que la construcción de un kilómetro.

El segundo paso del desarrollo de un modelo de variable múltiple es la determinación de qué tipos de fuentes emisoras deben incluirse en el modelo. Para las actividades agrícolas, esto podría definirse como las del cultivo, la cosecha y las emisiones de los escapes del equipo. En el caso de las actividades de construcción, esto podría ser mucho más complejo e incluir el movimiento de tierras, el manejo de materiales, los escapes de los equipos y otros tipos de fuentes de emisión. A la larga, el número total de tipos de fuentes de emisión cubiertos en el modelo está determinado por las actividades emisoras del sistema que se está caracterizando.

Después de definir los tipos de fuente que serán incluidos en el modelo de variable múltiple, el siguiente paso consiste en desarrollar los datos de emisiones que se usarán. Las emisiones de cada tipo de fuente en un solo sitio (de construcción, agrícola, etc.), se estiman utilizando métodos bibliográficos (i .e., ecuaciones empíricas), y datos específicos del sitio. Para crear un modelo de variable múltiple que sea coherente desde el punto de vista estadístico, es necesario repetir esta estimación

para varios otros sitios.

Después, las emisiones totales estimadas para cada sitio geográfico se graficarían contra cada una de las variables que caracterizan el sistema completo. Los sitios que difieran de manera considerable de los sitios representativos pueden producir estimaciones significativamente más altas o más bajas que podrían afectar negativamente el análisis estadístico. Estos datos puntuales deben ser considerados como “extremosos” y ser excluidos de análisis posteriores. A partir de estos datos graficados se puede determinar estadísticamente una tasa de emisión correspondiente al “mejor ajuste” para cada variable del sitio (i. e., kg de  $PM_{10}$ /acre de tomates, kg de  $PM_{10}$ /US\$ de construcción de edificios, etc.). Luego se usa análisis estadístico para evaluar la imprecisión de cada factor de emisión correspondiente al mejor ajuste y para cuantificar la incertidumbre de las estimaciones de emisiones. A partir de este análisis se selecciona la relación más exacta desde el punto de vista estadístico. Es probable que esta sea una relación lineal simple pero también es posible que sea exponencial, logarítmica o segmentada (i. e., los costos de construcción menores a 10 millones de dólares podrían tener una relación de mejor ajuste, mientras que aquellos con un costo mayor a 10 millones, podrían tener otra diferente).

Después de determinar la relación más apropiada de mejor ajuste, las emisiones regionales pueden ser estimadas insertando datos regionales en el modelo.

#### **4.2.2 Ejemplo de un Modelo de Variable Múltiple - Actividades de Construcción**

Las actividades de construcción son una fuente de área muy distribuida y pueden ser una fuente significativa de partículas ( $PM_{10}$ ). Debido a que las actividades de construcción están tan difundidas, por lo general no es factible estimar las emisiones de cada sitio de construcción individual. Esto hace que estas actividades sean candidatos ideales para los modelos de variable múltiple. El siguiente ejemplo ilustra, de manera conceptual, el desarrollo de un modelo de emisiones de variable múltiple. Los modelos reales de variable múltiple deben derivarse siguiendo los pasos que se describen a continuación.

**Identificación de las Variables del Sistema.** Existen diversas variables relacionadas con las actividades de construcción que caracterizan al sistema completo (emisiones  $PM_{10}$ ). Entre las variables más básicas del sistema se incluyen:

- Tipo de construcción (edificios, carreteras, vías de ferrocarril, etc.)
- Tamaño de la construcción (área del edificio, volumen de excavación, cantidad de concreto vaciado, etc.)
- Valor del proyecto y
- Número de trabajadores en la construcción.

Puede haber otras variables aplicables para algunos tipos especiales de actividades de construcción.

**Determinación de los Tipos de Fuentes Emisoras.** Las actividades de construcción generan emisiones de  $PM_{10}$  a partir de varias como:

- Demolición y remoción de escombros
- Excavación y otros movimientos de tierras
- Escapes de vehículos y equipo
- Manejo de materiales y
- Polvo rearrastrado.

**Desarrollo de los Datos de Emisiones.** Las emisiones para un sitio con una sola construcción se estiman sumando las emisiones calculadas de cada uno de los tipos de fuente, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$E_{\text{tot}} = \sum(x_{d.c.e.m.r})(V_{d.c.e.m.r}) \quad (4-21)$$

donde:

- $E_{\text{tot}}$  = emisiones totales en el sitio;
- $x$  = tasa de actividad;
- $y$  = factor de emisión;
- $d$  = demolición y remoción de escombros;
- $c$  = excavación y otros movimientos de tierras;
- $e$  = escapes de los vehículos y equipos;
- $m$  = manejo de materiales y
- $r$  = polvo rearrastado

En la Tabla 4-8 se enlistan tasas de actividad específicas del sitio ( $x_i$ ) y factores de emisión empíricos ( $y_i$ ) necesarios para estimar las emisiones de la construcción. También se incluyen los parámetros específicos del sitio contenidos dentro de los factores de emisión empíricos.

### Tabla 4-8

**Tasas de Actividad y Parámetros de los Factores de Emisión que se necesitan para Estimar las Emisiones de la Construcción**

Tipo de Fuente de Emisión	Tasa de Actividad ( $x_i$ )	Factor de Emisión ( $y_i$ )	Parámetros Específicos de Sitio que se requieren
Demolición y remoción de escombros (d)	Cantidad de material de demolición (Mg)	kg PM <sub>10</sub> /Mg de material de demolición <sup>a</sup>	Velocidad del viento (m/s) Contenido de humedad en el material de demolición (%)
Excavación y movimientos de tierras (c)	VKT vehículo	kg PM <sub>10</sub> /VKT <sup>a</sup>	Tipo de equipo
Escapes de vehículos y equipos (e)	Horas de operación	g PM <sub>10</sub> /hora de operación <sup>b</sup>	Tipo de equipo Tipo de combustible Potencia nominal Carga de operación
Manejo de	Cantidad de	kg PM <sub>10</sub> /Mg de	Velocidad del viento (m/s)

materiales (m)	material manejado (Mg)	material manejado <sup>a</sup>	Contenido de humedad en las pilas de almacenamiento (%)
----------------	------------------------	--------------------------------	---

### Tabla 4-8 (Continuación)

#### Tasas de Actividad y Parámetros del Factor de Emisión Necesarios para Estimar las Emisiones de la Construcción

Tipo de Fuente de Emisión	Tasa de Actividad (x <sub>i</sub> )	Factor de Emisión (v <sub>i</sub> )	Parámetros Específicos de Sitio que se requieren
Polvo rearrastrado (r)	VKT vehículo	kg PM <sub>10</sub> /VKT <sup>a</sup>	Contenido de sedimentos (%) Velocidad del vehículo (km/hr) Peso del vehículo (Mg) Numero medio de ruedas del vehículo (-) Precipitación (número de días por año con precipitación ≥ 0.254 mm)

<sup>a</sup> Las ecuaciones empíricas para la demolición y remoción de escombros, excavación y movimiento de tierras, manejo de materiales y polvo rearrastrado pueden encontrarse en *Fugitive Dust Background Document and Technical Information Document for Best Available Control Measures* (U.S. EPA, 1992)

<sup>b</sup> Los factores de emisión (g/hp-hr) para diferentes tipos de equipos pueden encontrarse en *Nonroad Engine and Vehicle Emission Study Report* (U.S. EPA, 1991a). Podría ser necesario que se desarrollaran factores de emisión específicos para México.

**Graficación de los Datos de Emisiones.** Después de obtener las emisiones totales de PM<sub>10</sub> para todo el sitio (E<sub>tot</sub>) para varios sitios diferentes de construcción de edificios, los totales se graficarían contra el área de construcción del sitio, el valor del proyecto de construcción, el número de trabajadores y cualesquier otra variable relevante del sistema. En la Figura 4-2 se grafican datos hipotéticos para seis sitios (con los literales E<sub>1</sub> hasta E<sub>6</sub>).

**Análisis Estadístico de los Datos Graficados.** El siguiente paso es determinar estadísticamente la relación de “mejor ajuste”, entre las diferentes gráficas de datos. Para los datos hipotéticos graficados en la Figura 4-2 se asume que la relación del “mejor ajuste” es una regresión lineal simple que interseca el eje de las ordenadas en el origen (i. e., sin construcción no hay emisiones de PM<sub>10</sub>). En este ejemplo hipotético la comparación de los valores de R<sup>2</sup> resultantes indican que la

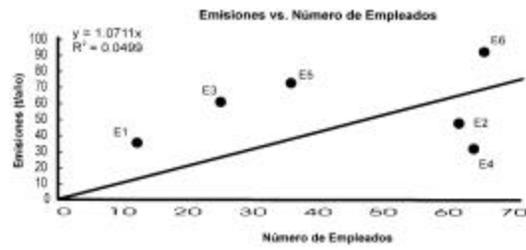
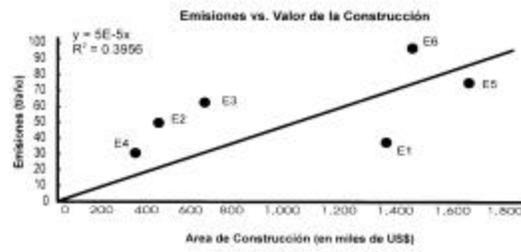
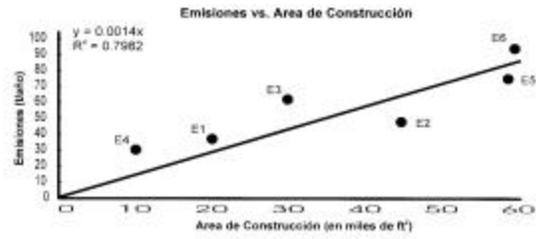
relación estadística más fuerte está entre las emisiones de  $PM_{10}$  y el área de construcción. En situaciones reales es probable que las emisiones no sean dependientes de una sola variable del sistema sino que dependan de varias.

**Cálculo de las Emisiones Regionales.** Una vez que se ha establecido que la relación de mejor ajuste entre las emisiones de  $PM_{10}$  y el área de construcción es estadísticamente válida la aplicación de esta relación para calcular las emisiones en toda la región es bastante directa. Como se puede ver en la graficación de emisiones contra el área de construcción de la Figura 4-2, la ecuación que determina la regresión lineal es:

$$\text{Emisiones Totales de } PM_{10} \text{ (ton/año)} = 0.0014 \times \text{Area de Construcción (m}^2\text{)}$$

Si el área total hipotética de construcción a nivel regional es de 2,600,000  $m^2$  entonces las emisiones regionales de  $PM_{10}$  de la construcción son:

$$0.0014 \times (2,600,000 \text{ m}^2) = 3640 \text{ ton/año de } PM_{10}$$



## 5.0 ENCUESTAS

---

Una encuesta es la técnica que se usa por lo común para recabar datos para los inventarios de emisiones de fuentes puntuales (Figura 5-1). El cuestionario debe enviarse a cada planta solicitando información acerca de las características de cada uno de sus dispositivos emisores. El uso de un cuestionario para reunir datos de emisiones de fuentes puntuales no es nuevo en México. El Instituto Nacional de Ecología (INE) ha estado recabando datos de fuentes puntuales con esta técnica por varios años. En el Apéndice III-B se muestra una copia del cuestionario nacional de fuentes puntuales

También se puede usar el método de encuesta para reunir la información necesaria para calcular las estimaciones de fuentes de área o para desarrollar factores de emisión específicos para una región que sirvan para hacer ciertas estimaciones de emisiones de fuentes de área. La Figura 5-2 ilustra el proceso para fuentes de área.

La realización de una encuesta consta de varios pasos. Ya sea para una encuesta de fuentes puntuales o de área, el primer paso es determinar un tamaño adecuado de muestra e identificar las plantas y subcategorías, así como las diferencias en los procesos dentro de la categoría de fuentes encuestada. A continuación, se deben preparar las listas de distribución por correo. Se deben diseñar los cuestionarios, ordenarlos, y enviarlos por correo o entregarlos personalmente. Se deben preparar y organizar los procedimientos para el manejo de datos y se deben establecer sistemas para la recepción de las respuestas. Se requiere un considerable esfuerzo mental y de planeación para diseñar un nuevo cuestionario o para modificar alguno ya existente. El grado de éxito de una encuesta depende mucho de si ésta se encuentra apoyada por una agencia regulatoria y también de qué tan concisa es, de su facilidad de uso y de lo general del cuestionario.

Además, las respuestas deben sujetarse a profundas revisiones para el aseguramiento y control de calidad (AC/CC) para eliminar los datos inválidos (e. g., velocidades supersónicas del gas a la salida de la chimenea). El costo de una encuesta está en función de qué tan completos y específicos sean los cuestionarios, del tamaño de la audiencia blanco y de la profundidad de las actividades de seguimiento para el control y aseguramiento de calidad.

El material presentado en el resto de esta sección tiene como objetivo introducir al lector al concepto de encuesta, y brindar información sobre los antecedentes de las técnicas utilizadas para conducir una encuesta exitosa. Estas técnicas son aplicables tanto a fuentes puntuales como de área. Para mayor información acerca del uso de cuestionarios específicos referirse al documento intitulado *Development of Questionnaires for Various Emission Inventory Uses* (Holman and Collins, 1979).

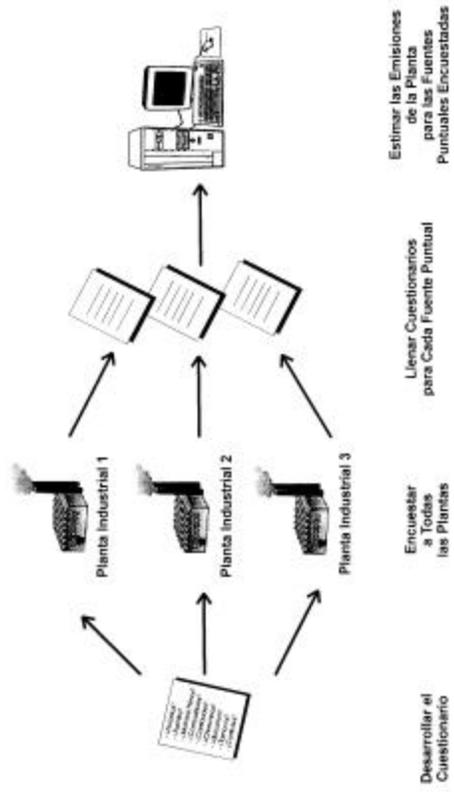


Figura 5-1. Ejemplo de una Encuesta de Fuente Puntual

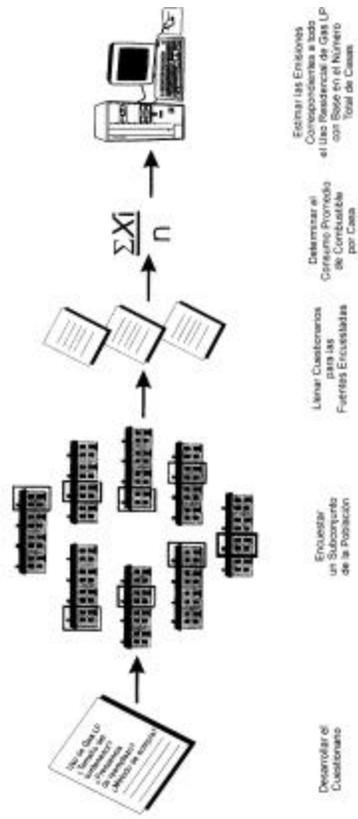


Figura 5-2. Ejemplo de Encuesta de Fuentes de Área

## 5.1 Planeación Inicial

Si bien no son complicadas existen varias consideraciones importantes que es necesario tener en mente cuando se planea y se conduce una encuesta. En esta sección se resumen las consideraciones más relevantes que son aplicables tanto a las fuentes puntuales como a las de área. La clave de una buena encuesta es una planeación adecuada. Algunos puntos importantes que deben ser considerados durante la fase inicial de planeación, tanto para encuestas de fuentes puntuales como para encuestas de área son:

- Siempre se han enviado copias de los cuestionarios impresos en a las plantas individuales. Otra opción es utilizar medios computarizados (discos o transmisión electrónica) en lugar de papel para devolver o actualizar las respuestas del cuestionario a la agencia. Esta técnica también puede incluir el uso de formas estandarizadas de computadora o software, de manera que los datos presentados a la agencia se encuentren en un formato que sea manejado fácilmente por su personal. Esta técnica no ha sido utilizada en México pero otras regiones han encontrado varios beneficios en ella. Si está diseñado adecuadamente el cuestionario electrónico puede ser mucho más sencillo de llenar y reduce a un mínimo la captura de datos, y las revisiones de Aseguramiento de Calidad.
- Recopilar las listas de distribución de diversas fuentes, utilizando otras fuentes diferentes y verificarlas en forma cruzada.
- Contar con todas las autorizaciones administrativas que se necesiten conforme a las regulaciones federales o estatales para hacer una encuesta del sector privado.
- Explicar las razones para la encuesta durante la fase inicial de contacto, ya sea por teléfono o por correo.
- Considerar quién debe hacer el contacto con el receptor de la encuesta. Las tasas de respuesta para las encuestas industriales pueden ser más elevadas si la agencia estatal o federal, y no un contratista, se pone en contacto con el receptor.

- El proceso de encuesta consta de varios pasos que incluyen la identificación del receptor correcto dentro de la planta. Para ello, se debe arreglar una entrevista a las horas más convenientes, se debe hablar directamente con el receptor y responder a las preguntas sobre la encuesta. Por ejemplo, los pasos a seguir serían:
  - Establecer contacto con la planta por carta o por teléfono para informarles acerca de la encuesta y acordar un horario adecuado para responder las preguntas. Asegurarse de que la persona contactada tenga la capacidad para responder las preguntas de la encuesta.
  - Enviar las preguntas de la encuesta al receptor
  - Hacer una segunda llamada para entrevistar al receptor acerca de las preguntas de la encuesta.

Una vez que se han identificado las plantas y se han desarrollado el o los cuestionarios, la encuesta de fuentes puntuales ya es directa. A continuación se resumen varios aspectos importantes para planear una encuesta de fuentes de área:

- Investigar y, si es necesario, subdividir la categoría de fuentes. Muchas categorías de fuentes de área, tales como el desengrasado y la pintura consisten de diversos procesos que son utilizados por muchas industrias diferentes. Los usos de procesos particulares pueden variar mucho de una industria a otra. Se puede estratificar la población de fuentes si es necesario (ver Sección 5.3).
- Diseñar la encuesta para un punto razonable dentro del proceso de distribución del producto. En el caso de muchas categorías de uso de solventes se podría enviar una encuesta ya sea a los fabricantes, a los distribuidores, a los minoristas o a los usuarios, pero la decisión más práctica podría enviarla sólo a los fabricantes o sólo a los distribuidores.
- Considerar las necesidades futuras en la planeación de la forma de encuesta. Planear por adelantado, si es posible. Por ejemplo, el cuestionario puede recopilar datos o información para los cálculos de emisiones. Como parte del proceso de planeación de la calidad del aire las proyecciones de emisiones también se anticipan. Por lo tanto, se debe reunir información sobre las proyecciones de emisiones al mismo tiempo que se recaban los datos básicos.
- Para las fuentes de área, se debe planear la manera en que la información reunida a través de la encuesta será escalada para hacer el inventario de toda la región dado que es probable que el diseño de la encuesta cubra sólo una muestra de todas las fuentes y es poco factible que se tenga una tasa de respuesta del 100 por ciento. Identificar una actividad sustituta razonable, de ser necesario, y planear la recopilación de dicha información en la encuesta (ver Sección 5.4).
- Cuando la recopilación de los datos se basa en sitios identificados por el código

CMAP, (Clasificación Mexicana de Actividades y Productos) y el proceso de categoría de la fuente pueda o no llevarse a cabo en todos los sitios con ese código CMAP, se debe refinar la lista de distribución identificando los sitios que sí utilizan el proceso:

- Por ejemplo, la pintura industrial por lo general está asociada con varios códigos CMAP pero es probable que no todas las plantas dentro en un código particular tengan operaciones de pintura.
- Si se habla a una planta antes de enviar la encuesta la distribución puede ser más eficiente. Esto también servirá para identificar la proporción de plantas en un código CMAP que utilizan o no un proceso, lo que es útil para el escalamiento de los datos de la encuesta de fuentes de área.

## 5.2 **Identificación de Plantas**

Un paso necesario en la encuesta es la elaboración de una lista de contactos en forma de tabla con el nombre, dirección y categoría general del proceso (e. g., manufactura de productos de madera) de cada planta que podría encuestarse. El propósito de la lista de contactos es identificar las plantas individuales que serán encuestados. El tamaño de la lista resultante proporciona a la agencia una indicación de los números y tipos de fuentes que pueden ser considerados de manera efectiva en la encuesta dentro de las acciones de los recursos. A este respecto, la lista de contactos puede ser utilizada para ayudar a una agencia a determinar si los recursos asignados a la tarea de recopilación serán suficientes y para proporcionar la información básica necesaria para desarrollar un subconjunto de muestreo. El número correcto de muestras (cuestionarios devueltos y llenados de manera correcta), debe determinarse basándose en técnicas de muestreo racionales estadísticamente desde el punto de vista en la prioridad dada a la categoría y en los recursos disponibles.

La lista de contactos debería ser recopilada a partir de una variedad de fuentes de información, que incluyen:

- Los listados de fuentes de emisiones al aire incluidas en los inventarios de emisiones existentes constituyen un buen punto de partida.
- Los listados de fuentes de contaminación del agua y de generadores de residuos peligrosos pueden ser utilizados para identificar las fuentes potenciales en varias CMAPs.
- Los archivos de la agencia de control de la contaminación del aire pueden proporcionar información valiosa acerca de la ubicación y tipos de fuentes en la región de interés. Estos archivos también pueden ser utilizados después para la verificación cruzada de cierta información proporcionada en los cuestionarios.
- Los archivos de otras agencias gubernamentales mantenidos por los departamentos laborales y fiscales ayudan con frecuencia en la elaboración de la lista de distribución. Dichos archivos incluyen varios directorios industriales estatales en los que las empresas están organizadas por orden alfabético por código CMAP y por municipio.

- Los directorios industriales locales pueden proporcionar una lista actual de las fuentes que operan en la región del inventario. Estos a menudo están organizados por código CMAP y pueden dar datos de empleo. Por ejemplo, los listados de plantas a lo largo de la frontera pueden obtenerse de la Asociación de Maquiladoras.
- Se pueden usar publicaciones nacionales, cuando estén disponibles. Sin embargo, la información que contienen puede ser más antigua y menos exacta que las referencias locales primarias.

La lista de correo debe ser organizada para facilitar las actividades de distribución y seguimiento. Un orden lógico para enlistar a las empresas sería por estado o por municipio, luego por código CMAP y finalmente por orden alfabético. Al ordenar la lista en esta forma se incrementa la eficiencia de todas las actividades subsecuentes de manejo de datos y permite que la revisión de control de calidad sea más rápida.

## 5.3 Selección de Muestras

Para las fuentes de área, el desarrollo del plan de encuesta implicará tomar decisiones relacionadas con la selección (o muestreo) de las plantas que se van a incluir en la encuesta. Dependiendo de los objetivos de ésta, se pueden utilizar diferentes técnicas de muestreo. Algunas de estas técnicas se presentan en la Tabla 5-1. Para el desarrollo de estimaciones de las emisiones de fuentes de área, en general, se pueden usar técnicas de muestreo aleatorio o de selección por muestreo aleatorio estratificado. Si la población de fuentes es suficientemente pequeña, se puede seleccionar la población completa. Si la población es grande y no es posible encuestar cada planta debe seleccionarse un subconjunto de la población. Se debe dar especial atención a la selección de la muestra para que los resultados de la encuesta se mantengan sin sesgos. Una discusión profunda de procedimientos estadísticos para seleccionar muestras queda fuera del alcance de esta sección. El lector debe referirse a exposiciones más detalladas sobre este tema, tales como los libros de texto *Sampling Techniques* (Cochran, 1977) y *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring* (Gilbert, 1987).

El concepto de un enfoque de muestreo aleatorio estratificado puede ser sumamente útil para el desarrollo de estimaciones de emisiones de fuentes de área, así como para la generación de datos que puedan usarse en modelos de emisiones de variable múltiple. En esta técnica, la población de  $N$  unidades se divide en  $N_1, N_2, \dots, N_L$  unidades de subpoblaciones. Estas subpoblaciones, o estratos, no se traslapan y en conjunto abarcan la población entera. Cuando los estratos han sido determinados se retira una muestra de cada uno de ellos con extracciones realizadas de manera independiente en diferentes estratos. Los tamaños de muestra son denominados  $n_1, n_2, \dots, n_L$ , respectivamente. Desde el punto de vista de un inventario de emisiones, la razón principal para conducir este tipo de enfoque para el muestreo es dividir una población heterogénea en subconjuntos, cada uno de los cuales tiene mayor posibilidad de ser internamente homogéneo. A continuación se presenta un ejemplo conceptual

### Ejemplo 5-1

La mayor parte de las áreas urbanas con una economía diversificada contienen numerosas fábricas pequeñas que pueden estar utilizando solventes, principalmente para aplicar pintura, desengrasar o para operaciones de limpieza. Muchos de estos establecimientos no estarán incluidos en el inventario de fuentes puntuales y comprenderán numerosas y diversas operaciones de manufactura (e. g., fabricación y pintura de productos de madera; pintura de plásticos; fabricación y pintura de partes metálicas variadas, etc.). Debido al gran número de operaciones y a sus diferencias en las características de materias primas y producción, es necesario desarrollar una encuesta que recopile

exactamente la información que puede ser extrapolada estadísticamente a la población entera de plantas con fuentes no puntuales. Para resolver este problema se puede usar una encuesta aleatoria estratificada.

En el primer estrato se podrían dividir las plantas en grupos en base a un código CMAP de dos dígitos de manera que los establecimientos semejantes queden en el mismo grupo (i. e., es probable que las plantas que fabrican materiales parecidos tengan emisiones con características semejantes). En un segundo estrato se podría considerar necesario distinguir las fábricas grandes de las pequeñas, para evitar los sesgos resultantes de las diferentes tasas de uso de material que podrían ocurrir debido a la eficiencia en la operación de la fábrica. Una vez que la encuesta esté terminada y que las emisiones hayan sido calculadas, los datos de emisiones pueden ser correlacionados con los estratos utilizados para definir las subpoblaciones, en este caso, el código CMAP de dos dígitos y el número de empleados

**Tabla 5-1**  
**Tipos de Métodos para el Muestreo en Encuestas**

<b>Método</b>	<b>Descripción</b>	<b>Condiciones en las que el Diseño del Muestreo es Util<sup>a</sup></b>
Muestreo <i>Haphazard</i>	“Cualquier ubicación de muestreo sirve”. Se toman las muestras en sitios o tiempos convenientes. Puede conducir a estimaciones sesgadas.	Una población muy homogénea en el tiempo y el espacio es esencial si se necesitan estimaciones no sesgadas de los parámetros. Este método de selección <i>no</i> es recomendado, debido a la dificultad para verificar esta suposición.
Muestreo Basado en el Juicio	Selección subjetiva hecha por un individuo. Selecciona muestras que parecen ser “representativas” de las condiciones promedio. Puede llevar a estimaciones sesgadas. La exactitud es difícil de medir.	La población blanco debe ser definida con claridad, debe ser homogénea y completamente evaluable, de manera tal que el sesgo de la selección de muestra no sea un problema. Por el contrario, las muestras específicas se seleccionan por su valor único e interés más que por sus inferencias con una población más amplia.
Muestreo Aleatorio Simple	Cada unidad de población tiene la misma oportunidad de ser seleccionada para medición. La selección de una unidad no tiene influencia sobre la selección de otras unidades.	Es el diseño de muestreo aleatorio más simple. Otros diseños que se describen a continuación con frecuencia arrojarán estimaciones más exactas de las medias si la población tiene tendencias o patrones de tasas de emisión.
Muestreo Aleatorio Estratificado	Divide la población blanco en partes que no se traslapan. Los sitios de muestreo de cada estrato son seleccionados por un muestreo aleatorio simple.	Es útil cuando una población heterogénea puede ser desglosada en partes que son internamente homogéneas. Por ejemplo, el uso de solventes podría ser estratificado de acuerdo con el producto final elaborado.
Muestreo Multi-Etapas	Divide la población blanco en unidades primarias. Selecciona un conjunto de unidades primarias utilizando un muestreo aleatorio simple. Hace submuestras aleatorias de cada una de las	Es necesario cuando las mediciones se hacen en submuestras de la muestra de campo. La aplicación de esta técnica es limitada para el desarrollo de inventarios de emisiones.

<b>Método</b>	<b>Descripción</b>	<b>Condiciones en las que el Diseño del Muestreo es Util<sup>a</sup></b>
	unidades primarias seleccionadas. Ejemplo: recolección de muestras de suelo (unidades primarias) al azar, luego seleccionar una o más alícuotas aleatorias de cada submuestra.	

**Tabla 5-1 (Contiuación)**  
**Tipos de Métodos para el Muestreo en Encuestas**

<b>Método</b>	<b>Descripción</b>	<b>Condiciones en las que el Diseño del Muestreo es Util<sup>a</sup></b>
Muestreo de Agrupamiento	Grupos de unidades individuales seleccionadas al azar. Todas las unidades en los grupos seleccionados son medidas.	Es útil cuando las unidades poblacionales se agrupan (cardúmenes, manchones de plantas, etc.), y cada unidad en cada grupo seleccionado aleatoriamente pueden ser medidas. La aplicación de esta técnica es limitada para el desarrollo de inventarios de emisiones.
Muestreo Sistemático	Toma medidas en sitios y/o tiempos, de acuerdo con un patrón espacial o temporal. Por ejemplo, a intervalos equidistantes a lo largo de una línea o en un patrón de rejilla.	Por lo general es el método elegido cuando se estiman tendencias o patrones de emisiones en el espacio. También es útil para estimar la media cuando no hay tendencias ni patrones o éstos se conocen <i>a priori</i> , o cuando los métodos estrictamente aleatorios son imprácticos.
Muestreo Doble	Si los datos obtenidos usando una técnica de medición tienen una fuerte relación lineal con los datos obtenidos con menor gasto o esfuerzo utilizando otra técnica se pueden tomar más muestras usando el método más barato. La relación lineal entre las dos técnicas se aplican entonces para estimar la media para el método más caro.	Es útil cuando existe una fuerte relación lineal entre la variable de interés y una variable menos cara o cuya medición sea más fácil.
Muestreo de Búsqueda	Se usa para localizar geográficamente fuentes de contaminación o para encontrar "puntos rojos" de alta contaminación.	Es útil cuando la información histórica, el conocimiento del sitio o las muestras previas indican donde es posible encontrar al objeto de la búsqueda. La aplicación de esta técnica es limitada para el desarrollo de inventarios de emisiones. Sin embargo, el enfoque puede usarse para desarrollar información que describiría las características espaciales de las emisiones en relación con un parámetro específico (por ejemplo, el uso de

<b>Método</b>	<b>Descripción</b>	<b>Condiciones en las que el Diseño del Muestreo es Util<sup>a</sup></b>
		equipo para podar y de jardinería contra el ingreso doméstico).

<sup>a</sup> Gilbert, 1987.

## 5.4 Determinación del Tamaño de Muestra

El número de encuestas que se envían depende de los recursos disponibles y de las metas iniciales establecidas para la exactitud de los resultados. Esta subsección proporciona una breve vista general de los procedimientos estadísticos para seleccionar un tamaño de muestra adecuado dada una meta de exactitud especificada. Para una explicación más profunda del material que se presenta a continuación, por favor consulte un libro estándar de texto sobre estadística.

Para muchas encuestas de fuentes de área la meta es establecer un valor promedio para un conjunto particular de parámetros que pueda usarse para estimar las emisiones de toda la población de fuentes. Por ejemplo, puede determinarse la cantidad promedio de pintura, o la cantidad promedio de gas LP que se utiliza por casa. En general, el "error" o incertidumbre en el valor promedio calculado a partir de los resultados de la encuesta puede hacerse mínimo si se muestrean muchas más fuentes. La incertidumbre en el valor promedio ( $\bar{x}$ ) puede expresarse como sigue:

$$\bar{x} = \pm \sigma A \quad (5-1)$$

donde:  $\sigma$  = Desviación estándar de la muestra  
 $A$  = t estadístico dividido entre el número de muestras ( $t/\sqrt{n}$ ).

El valor estadístico t varía con el tamaño de muestra y con el nivel de confianza deseado. Mientras más muestras se tomen el nivel de incertidumbre en el valor promedio disminuye. Sin embargo, se alcanza un punto de vueltas decrecientes cuando el número de muestras se acerca a 20. La Figura 5-3 ilustra este concepto graficando A (i.e.,  $t/\sqrt{n}$ ) contra el número de muestras tomadas. Esta gráfica particular es para un nivel de confianza del 90%.

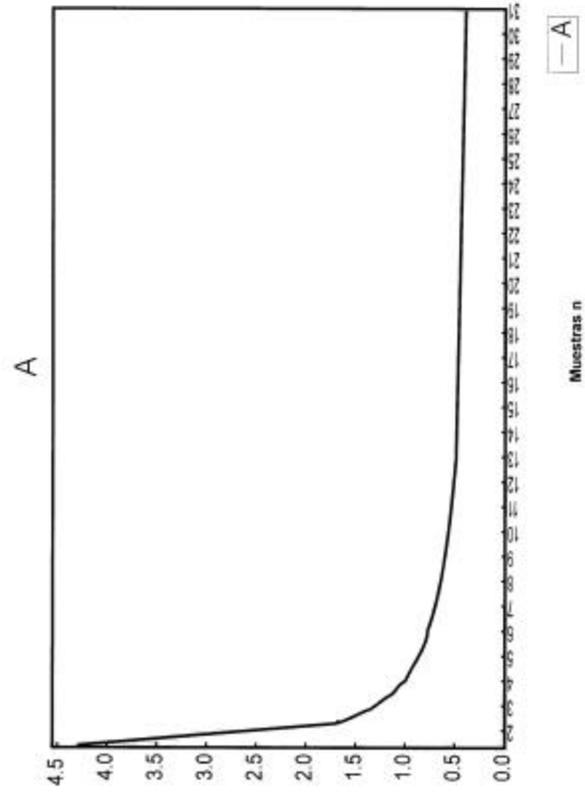


Figura 5.3. Influencia del Tamaño de la Muestra sobre la Incertidumbre

Si se desea, se puede determinar un enfoque más riguroso para calcular el tamaño adecuado de la muestra especificando la cantidad de error aceptable. Para establecer el tamaño de muestra en base al error aceptable se requiere un enfoque iterativo que comienza con una encuesta inicial. Suponiendo una tasa de respuesta del 50 por ciento, se limita la encuesta inicial a aproximadamente 40 cuestionarios de modo que se reciban alrededor de 20 respuestas. A partir de los resultados de la encuesta inicial se puede estimar un tamaño específico de muestra en base a las metas de error de la encuesta:

$$n = \frac{(Z_{\alpha/2})^2 \sigma^2}{e} \quad (5-2)$$

Donde:

- n = tamaño de la muestra
- $\sigma$  = desviación estándar de la población
- e = límite del error (generalmente dentro del intervalo del 5 al 10 por ciento del valor de la media)
- $\alpha$  = nivel de confianza
- $Z_{\alpha/2}$  = índice derivado de la curva normal que corresponde al nivel de confianza deseado

$\alpha$ por ciento	$Z_{\alpha/2}$
90.0	1.65
95.0	1.96
99.0	2.58
99.7	3.00

A continuación se presenta un ejemplo sencillo para ilustrar este concepto, para una encuesta hipotética aplicada al uso residencial de gas LP.

#### Ejemplo 5-2

Suponer que se desea un error no mayor del 10% en el nivel de confianza del 90% para una encuesta del uso residencial de gas LP. A partir de la encuesta hipotética, el uso promedio de gas LP determinado a partir de los cuestionarios iniciales es de 1,000 litros con una desviación estándar de 400 litros. Utilizando estos datos en la ecuación 5-2 el número de muestras necesarias es de:

$$n = \left[ \frac{1.65 \times 400}{0.10 \times 1000} \right]^2 = 44 \text{ muestras}$$

## **5.5 Limitación del Tamaño de la Encuesta por Correo**

Si en la lista de distribución por correo se identifican más fuentes de las que en realidad pueden manejarse con los recursos disponibles la agencia debe tamizarla de alguna manera para reducir el número de plantas a las que se enviarán cuestionarios. Esto puede hacerse de varias maneras.

En muchos casos se conoce el número de empleados en una empresa y puede hacerse una estimación del potencial de emisiones aplicando factores de emisión por empleado cuando estén disponibles. Esto dará una estimación gruesa del potencial de emisiones de esas plantas, que luego se puede usar para seleccionar una muestra de plantas que represente un intervalo de emisiones para recibir el cuestionario. Otra manera de reducir la lista de distribución es comunicarse por teléfono con los receptores potenciales de la encuesta antes de enviarla por correo. Estos breves contactos con los gerentes de planta o con otros empleados apropiados indicarán si el proceso emisor de contaminantes efectivamente se lleva a cabo en la planta. Si el proceso no se usa en la planta, la respuesta se puede registrar y no es necesario hacer ningún contacto posterior lo que reducirá el número de encuestas que se manden.

## **5.6 Diseño de los Cuestionarios**

Se debe elaborar un cuestionario para cada categoría de fuente encuestada. En estos cuestionarios se puede usar terminología específica de una industria en particular que resulte familiar para aquellos que ahí trabajan. Esto fortalece la comunicación, reduce la confusión y aumenta la exactitud del inventario. También puede ser productivo trabajar primero con un pequeño grupo focal de fuentes en la industria para refinar y hacer una "prueba de mercado" al cuestionario. Las aportaciones de personal capaz de en la industria ayudarán a eliminar ambigüedad en las respuestas y malentendidos respecto a las metas de la encuesta.

Aunque un cuestionario hecho a la medida para una industria o proceso en particular tiene muchas ventajas también presenta varios inconvenientes. El primero es que el diseño de muchos cuestionarios específicos por industria puede requerir recursos significativos. En segundo lugar, los cuestionarios que sean devueltos tendrán diferentes requerimientos para el almacenamiento de datos debido a las variaciones de formato para las diferentes industrias.

El desarrollo de un cuestionario implica identificar y redactar las preguntas correctas,

establecer un formato adecuado y hacer la portada y las instrucciones para el llenado. La regla básica es diseñar el cuestionario para la persona a quien se le solicitará que lo responda. Una agencia debe considerar que la persona que llenará el cuestionario puede no contar con los conocimientos técnicos en contaminación del aire, ingeniería o ciencias físicas. Por lo tanto, ni los cuestionarios ni las instrucciones deben diseñarse de manera tal que su comprensión requiera una capacitación técnica especializada. Cada pregunta debe explicarse por sí misma acompañarse con instrucciones precisas. Toda la información necesaria debe solicitarse en el cuestionario, evitando así solicitudes posteriores de datos adicionales. Cualesquier datos necesarios para la posterior aplicación de un modelo fotoquímico o de dispersión también deben recopilarse en este momento.

El formato del cuestionario debe ser lo más sencillo y funcional posible. Cuando el manejo de los datos se haga por computadora se ahorrará tiempo si el formato está diseñado de tal manera que el personal responsable de la administración de datos pueda introducir la información directamente de cada cuestionario. Si se está promoviendo un reporte computarizado de datos la agencia puede ahorrar tiempo en la captura. El cuestionario debe estar bien espaciado para facilitar su lectura y debe dejar espacio suficiente para las respuestas escritas. El cuestionario debe ser lo más corto posible dado que los cuestionarios largos intimidan. Además, los cuestionarios cortos reducen los costos de envío.

Siempre debe tomarse en cuenta cual será el uso final de los datos cuando se determine la información que se va a pedir en el cuestionario. Para las fuentes puntuales, también debe pedirse información del proceso además de las tasas de emisión y otra información general de la fuente como ubicación, propiedad y naturaleza del negocio. Debe hacerse un esfuerzo para solicitar los datos del nivel de actividad para el año y la estación del inventario. Si no es posible obtener los datos para el periodo adecuado se deben incluir preguntas para recopilar la información necesaria para calcular factores de ajuste temporal de la manera más exacta posible. La información sobre los dispositivos de control también es útil para determinar las reducciones potenciales en las emisiones al aplicar diversas estrategias de control.

Finalmente, se debe solicitar cualquier información que se necesite para hacer estimaciones de emisión corregidas o ajustadas. Por ejemplo, debido a que las emisiones de las operaciones de almacenamiento y manejo de productos derivados del petróleo dependen de numerosos variables que incluyen la temperatura, las condiciones del tanque y la presión de vapor del producto, el cuestionario debe incluir la solicitud para poner los valores apropiados de estas variables. Si se considera hacer ajustes estacionales, debe darse un énfasis especial a variables como niveles de actividad, temperatura y velocidad del viento las que pudieran ocasionar variaciones estacionales en las emisiones.

Cada cuestionario debe ser acompañado por una carta en la que se establezca el propósito del inventario y en la que cite cualesquier estatutos que requieran respuesta por parte del receptor. Se debe solicitar de manera respetuosa, la cooperación del receptor del cuestionario para su llenado y devolución. Además, cada cuestionario debe acompañarse de un conjunto de procedimientos e instrucciones generales que indiquen al receptor la forma en que debe ser llenado, así como la fecha en que debe ser devuelto a la agencia. En lugar de establecer una fecha específica se puede indicar un número específico de días naturales o hábiles para responder. De esta manera, los retrasos en el correo no implicarán cambios en la fecha de respuesta.

Si se envía un cuestionario más general, las instrucciones deben explicar claramente que éste ha sido diseñado para una gran variedad de operaciones y que algunas preguntas o secciones pueden no ser aplicables a una planta particular. En todos los casos, se debe dar el nombre de un contacto, su número telefónico y dirección en caso de que algún receptor tenga preguntas. Algunas veces es posible combinar la carta-portada y las instrucciones, pero esto sólo debe hacerse cuando las instrucciones sean breves.

## **5.7 Envío y Rastreo de los Cuestionarios**

Después de que la lista final de distribución ha sido recopilada y que se han armado los paquetes apropiados de cuestionarios (incluyendo etiqueta, carta-portada, instrucciones, cuestionarios y sobre con porte pagado) la agencia podría iniciar los envíos. El envío de los cuestionarios puede hacerse de dos maneras: la primera es a través de correo certificado, lo que sirve para que la agencia sepa cuando se recibió el cuestionario. Esto no garantiza que la empresa devolverá la forma, pero es probable que la tasa de respuesta sea algo más alta que si los cuestionarios fueran enviados por correo de primera clase. Sin embargo, es posible que el pequeño incremento en la respuesta no justifique el gasto

*Programa para el Inventario de Emisiones de México*

extra de enviar una carta certificada a cada empresa. Como término medio se puede usar correo certificado solamente para contactar las grandes fuentes.

El segundo método consiste en enviar los cuestionarios por correo de primera clase convencional. Se ha comprobado que este método es efectivo si la dirección incluye el nombre del gerente de planta, o si escribe "ATENCION GERENTE DE PLANTA" en el sobre. Esto dirige el paquete al personal de supervisión adecuado y reduce las posibilidades de que sea desechado. Es muy recomendable incluir un sobre con porte pagado con cada cuestionario porque así es más probable que sea devuelto.

Los errores en las direcciones constituyen una gran proporción de los cuestionarios que no son regresados. Por lo tanto, el esfuerzo extra aplicado para obtener las direcciones correctas será recompensado. Asimismo, es importante distinguir entre la ubicación física de una planta y su dirección postal. La identificación de la dirección postal puede tener un efecto crítico en la tasa de respuesta del cuestionario.

Las respuestas pueden comenzar a llegar pocos días después del envío. Muchos de los retornos tempranos pueden venir de empresas que no son fuentes de emisiones. También, algunos otros cuestionarios serán devueltos a la entidad por el correo debido a que las fábricas ya no están en funcionamiento, o la empresa ya no está en la dirección indicada. Las nuevas direcciones de las empresas que se han mudado pueden obtenerse llamando a los establecimientos, buscándolas en los directorios telefónicos, o a través de las agencias estatales o locales pertinentes, tales como las oficinas fiscales o las laborales.

Un programa de computadora sencillo puede ser útil para enviar y registrar los cuestionarios. Este programa podría ser diseñado para producir etiquetas de correo por duplicado para cada fuente a la que se envía un cuestionario. Una etiqueta es adherida al sobre que contiene los materiales del cuestionario y la segunda se anexa a la carta-portada o a la hoja de instrucciones del cuestionario. Esto facilita la identificación de los cuestionarios a medida que son devueltos, así como las correcciones en el nombre y dirección. Las etiquetas postales adicionales se pueden utilizar para otros propósitos administrativos o para volver a hacer contacto con las fuentes cuyas respuestas sean inadecuadas. A continuación se muestra un ejemplo de la información de una etiqueta.

**Ejemplo 5-3**

0000 (Código CMAP)

0000 (Planta Número)

NOMBRE DEL INDIVIDUO Y TITULO (GERENTE DE PLANTA)

NOMBRE DE LA EMPRESA

CALLE

MUNICIPIO, ESTADO, CP

Como se muestra en el ejemplo de etiqueta, puede ser útil imprimir el código CMAP y el número de identificación asignado a la planta en la esquina superior derecha. El número de identificación (ID) puede utilizarse para agrupar los registros de toda la correspondencia con una empresa. Si el área de estudio es grande, el número de identificación del municipio también puede incluirse en la etiqueta. Debe tenerse cuidado de separar la información de codificación interna de la dirección, de manera que la oficina postal no la confunda con la dirección.

Es importante desarrollar un sistema de rastreo para determinar el estado de cada etapa de la encuesta por correo. Dicho sistema le dirá a la agencia: (1) a qué empresas enviaron cuestionarios; (2) las fechas en que los cuestionarios fueron enviados y devueltos; (3) nombre, dirección e información CMAP corregidos; (4) información sobre el tipo de fuente; (5) si un segundo contacto es necesario y (6) el estado del contacto de seguimiento. El rastreo puede hacerse manualmente con hojas de cálculo o usando un programa sencillo de computadora. Una impresión de computadora de la lista de distribución puede formatearse para usarla como hoja de rastreo.

Tan pronto como los cuestionarios son devueltos se pueden hacer algunos análisis útiles. Una actividad que puede ayudar a terminar la encuesta a tiempo, así como ayudar a estimar los recursos que serán necesarios después para hacer el inventario es la clasificación de cada respuesta en una de las cinco categorías enlistadas a continuación:

P	=	Fuentes puntuales
A	=	Fuentes de área
N	=	No hay emisiones (no hay fuente)
C	=	Cerrado/clausurado
R	=	Volverá hacer el contacto para reclasificación.

Además, la agencia puede comenzar a hacer los cálculos de emisiones para las fuentes que han respondido y la información resultante de fuentes y emisiones puede empezar a ser cargada en los archivos del inventario. Entonces, todas las respuestas deben ser archivadas por código CMAP, categoría de fuente, ubicación geográfica, orden alfabético o por cualquier otro criterio que dé un acceso ordenado para cualquier análisis adicional.

## **5.8 Renovación de Contactos**

La agencia puede requerir hacer contacto nuevamente con la empresa si ésta no devuelve el cuestionario o si la respuesta proporcionada no es la adecuada. En el primer caso, debe enviarse una carta más formal, por correo certificado, donde se citen los requerimientos estatutarios de reporte para el llenado del cuestionario. Cuando el número de empresas que se deben volver a contactar es pequeño la información puede obtenerse por teléfono o haciendo visitas a las plantas.

La renovación de contactos debe comenzar dos o cuatro semanas después de que los cuestionarios han sido enviados. Las llamadas telefónicas son ventajosas porque se trata de comunicación verbal se pueden evitar costos postales adicionales. Sería necesario enviar una segunda carta de seguimiento. Si el número de empresas que deben volverse a contactar es grande. En cualquier caso, el segundo contacto debe hacerse entre 8 y 12 semanas después del primer envío.

## **5.9 Acceso a los Archivos de Contaminación del Aire de la Agencia**

En la agencia puede haber archivos especiales o bases de datos que se pueden usar para hacer el inventario de emisiones. Entre estos archivos puede licencias, datos sobre cumplimiento o informes de emisiones. En general, se requieren licencias para la construcción, arranque, modificaciones y operación continua de una fuente emisora. Las solicitudes de licencia normalmente incluyen información suficiente acerca de una fuente potencial para describir su naturaleza y estimar la magnitud de las emisiones que resultarán de sus operaciones. Algunas licencias también incluyen datos de muestreos en la fuente.

Algunas agencias pueden también guardar un archivo de cumplimiento en el que se registra la interacción de la agencia con cada fuente en lo relativo la aplicación de regulaciones. Por

ejemplo, un archivo de cumplimiento podría contener una lista de las regulaciones de contaminación del aire aplicables a una fuente dada, el historial de los contactos hechos con dicha fuente sobre aplicación de la legislación y un calendario acordado con la fuente para efectuar algún tipo de medidas de control.

## **5.10 Escalamiento de los Resultados de la Encuesta**

Una encuesta de fuentes de área diseñado de manera adecuada también deberá incluir un mecanismo para “escalar” los resultados. Por la naturaleza del tipo de fuente puede no ser posible encuestar el universo de fuentes cubiertas por la categoría. El método para escalar los resultados dependerá del tipo de fuente que se incluya en la encuesta. A continuación se presentan dos ejemplos:

De una manera sencilla, los resultados de la encuesta pueden ser escalados aplicando el uso promedio de material (o de emisiones) determinado a partir de la encuesta a toda la población de fuentes. Desde una perspectiva de emisiones, este enfoque asume que la población de fuentes es independiente del tamaño. Por ejemplo se podría hacer una encuesta de uso residencial de gas LP para estimar de manera más precisa la cantidad de este combustible que se consuma a nivel residencial. No es práctico hacer una encuesta casa por casa por lo que podría encuestarse un subconjunto de la población y escalar los resultados a la población completa. Para este ejemplo hipotético, la cantidad promedio de gas LP utilizado por casa determinaría a través de la encuesta aplicando el valor promedio al número total de casas en la región. A continuación se presenta un ejemplo simple:

**Ejemplo 5-4:**

Con base en una encuesta de un subconjunto de casas que utilizan gas LP el uso anual promedio de gas LP es de 1,000 litros/año. Datos disponibles de censos indican que hay 500,000 casas en la región y que el 90% de ellas usan gas LP como combustible doméstico. Estimar las emisiones totales de  $\text{NO}_x$  provenientes del uso doméstico de gas LP en la región.

$$\begin{aligned} Q_{\text{LPG}} &= 1,000 \text{ litros/casa/año} \times 500,000 \text{ casas} \times 90\% \\ &= 450 \text{ millones de litros/año} \end{aligned}$$

(AP-42, Sección 1.5)

$$\begin{aligned} FE_{\text{NO}_x} &= 1.7 \text{ kg/1,000 litros} \\ E_{\text{NO}_x} &= Q_{\text{LPG}} \times FE_{\text{NO}_x} \\ &= (450 \times 10^6 \text{ litro/año}) \times (1.7 \text{ kg/1,000 litros}) \\ &= 765,000 \text{ kg NO}_x/\text{año.} \end{aligned}$$

Si se espera que el uso del material varíe dependiendo del tamaño de la fuente se requiere un enfoque más complejo. Por ejemplo, la cantidad de material utilizado en las operaciones de pintura de madera variará en base al nivel de producción del establecimiento. El diseño de la encuesta debe incluir preguntas que recopilen información suficiente para que se pueda usar para escalar los resultados a otras plantas que no se hayan incluido en la encuesta. Estos datos pueden ser, por ejemplo, el número de empleados, o parámetros económicos tales como el valor de los bienes o servicios producidos. La clave es pensar por adelantado e identificar los parámetros adecuados que se pueden usar para escalar los resultados del inventario a otras fuentes. A continuación se presenta un ejemplo sencillo:

**Ejemplo 5-5:**

Con base en la encuesta de un subconjunto de plantas en que se fabrican productos de madera, el uso promedio de pintura por empleado es de 30 litros/año. El número total de empleados relacionados con la manufactura de productos de madera en la región es de 1,050, con base en datos de CANACINTRA. Adicionalmente, los resultados de la encuesta indican que la pintura promedio tiene una densidad de 1.4 kg/litro y un contenido de COVs del 45%, por peso. Estimar las emisiones de COVs totales de la manufactura de productos de madera en la región

$$\begin{aligned} Q &= 30 \text{ litros/empleado/año} \times 1,050 \text{ empleados} \\ &= 31,500 \text{ litro/año} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} FE_{\text{COV}} &= 1.4 \text{ kg/litro} \times 45\% \\ &= 0.63 \text{ kg/litro} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{\text{COV}} &= Q \times EF_{\text{COV}} \\ &= 31,500 \text{ litro/año} \times 0.63 \text{ kg/litro} \\ &= 19,845 \text{ kg COV/año} \end{aligned}$$

# 6.0 FACTORES DE EMISION

---

Los factores de emisión se usan a menudo para calcular las emisiones

cuando los datos de monitoreo de chimeneas específicos del sitio no están disponibles. Un factor de emisión es una relación entre la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera con una unidad de actividad. Los factores de emisión, en general, se pueden clasificar en dos tipos: los basados en procesos y los basados en censos. Por lo general, los primeros se usan para desarrollar estimaciones de emisiones de fuentes puntuales y a menudo se combinan con los datos de actividad recopilados de una encuesta o de un balance de materiales. Los factores de emisión basados en censos, por otro lado, se usan mucho para hacer estimaciones de emisiones de fuentes de área (ver Figura 6-1).

## 5.1 Factores de Emisión Basados en Procesos

Se han realizado varios programas de muestreo de fuentes para medir las tasas de emisión de ciertos dispositivos o procesos que se sabe que son fuentes de emisiones al aire. Puesto que con frecuencia no se requiere ni es económicamente factible hacer un muestreo en cada fuente emisora, los resultados de muestreos de “fuentes representativas” se usan para desarrollar factores de emisión basados en procesos, para dispositivos o procesos similares. Estos factores se expresan en la forma general de masa de contaminante emitido por unidad de proceso. Entre las unidades de proceso más comunes se encuentran el consumo de energía, el rendimiento de materiales, las unidades de producción, el calendario de operación, o el número de dispositivos ó las características de éstos. (e. g., lb/MMBtu, lb/gal, lb/lote, lb/hr ó lb/pie<sup>2</sup> [área superficial]).

**Factores de Emisión Basados en Procesos**

Caldera de Gas Natural		kg de contaminante/10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> de gas quemado
Desengrasador de Vapor		kg de contaminante/hr/m <sup>2</sup> de área superficial del desengrasador
Manufactura de Baterías		kg de contaminante/10 <sup>3</sup> baterías

**Factores de Emisión Basados en Censos**

Per Cápita		kg de contaminante/persona/año
Por Empleado		kg de contaminante/empleador/año

**Figura 6-1. Ejemplos de Factores de Emisión**

La fuente de consulta más extensa para factores de emisión basados en procesos, específicos para los Estados Unidos, es el documento *AP-42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors* (U.S. EPA, January 1995a). La referencia principal para factores de emisión de contaminantes tóxicos del aire es el sistema de datos FIRE (U.S. EPA, 1995b).

En el documento de guía Rapid Source Inventory Technique preparado para la OMS (WHO) (Economopoulos, 1993) se encuentran factores de emisión no específicos para los Estados Unidos para diversos conjuntos de fuentes. Este tipo de factores también se hallan en documentos de guía para inventarios de gases de invernadero (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 1993a y b).

A continuación se presentan algunos ejemplos de cálculos para estimaciones de emisiones utilizando factores de emisión basados en procesos. El Volumen IV - Fuentes Puntuales proporciona una guía más detallada sobre el desarrollo de estimaciones de emisiones para estas fuentes.

**Ejemplo 6-1:**

Calcular las emisiones anuales de NO<sub>x</sub> de una caldera sin control en una planta termoeléctrica de (consumo de calor > 100 millones de Btu/hr) que quema gas natural. El consumo anual de gas natural es de 50 millones de metros cúbicos.

$$\begin{aligned} FE_{NOX} &= 8800 \text{ kg}/10^6 \text{ m}^3 && (\text{Del/ AP-42, Tabla 1.4-2}) \\ Q_{\text{comb.}} &= 50 \text{ } 10^6 \text{ m}^3/\text{año} \\ E_{NOX} &= FE_{NOX} \times Q_{\text{comb.}} \\ &= 8800 \times 50 \\ &= 440,000 \text{ kg/año} \end{aligned}$$

**Ejemplo 6-2:**

Calcular las emisiones anuales de COVs de un desengrasador de vapor sin tapa y sin control. El solvente usado es 100% COV. El desengrasador tiene un área superficial de 5 metros cuadrados y opera 8 horas/día, 5 días/semana, 52 semanas/año.

$$\begin{aligned} FE_{COV} &= 0.7 \text{ kg/hr/m}^2 && (\text{Del AP-42, Tabla 4.6-2}) \\ A &= 5 \text{ m}^2 \\ T_{\text{horas}} &= 8 \text{ hrs/día} \times 5 \text{ días/sem} \times 52 \text{ sem/año} \\ &= 2080 \text{ hrs/año} \\ E_{COV} &= FE_{COV} \times A \times T_{\text{horas}} \\ &= 0.7 \times 5 \times 2080 \\ &= 7,280 \text{ kg/año} \end{aligned}$$

**Ejemplo 6-3**

Calcular las emisiones de partículas del proceso de fundición de rejillas en la producción de baterías de plomo ácidas. Cada mes se producen veinte mil baterías.

$$FE_{\text{part.}} = 1.42 \text{ kg}/10^3 \text{ baterías} \quad (\text{Del AP-42, Tabla 7.15-1})$$

$Q_{\text{product}}$	=	20,000 baterías/mes x 12 meses/año
	=	240,000 baterías/ año
$E_{\text{part.}}$	=	$FE_{\text{part.}} \times Q_{\text{producto}}$
	=	$1.42 \times 240$
	=	341 kg/año

## 5.2 Factores de Emisión Basados en Censos

Las fuentes de área en ciertas categorías son difíciles de inventariar usando cualquiera de las metodologías antes presentadas. El uso de factores de emisión basados en censos es un método eficiente para tipos de fuentes emisoras dispersas y numerosas que no se pueden caracterizar rápidamente conociendo las tasas de proceso, de consumo de combustible y/o de alimentación de materiales. Comparadas con otras técnicas de estimación de emisiones el uso de factores de emisión basados en censos es la opción más “amigable” y más costo-efectiva dado que los datos de censos ya están disponibles en la mayor parte de las regiones donde se hacen inventarios de emisiones. En México, los datos de población y vivienda y los datos de empleo por sector económico y municipio están disponibles, en formato impreso y electrónico, a través del INEGI.

La desventaja de usar factores de emisión existentes basados en censos es que la mayor parte de ellos fueron desarrollados en EU o en Europa y es posible que no representen las condiciones socioeconómicas y las prácticas de control en México. El Departamento del Distrito Federal (DDF) ha comenzado a desarrollar factores de emisión basados en el censo que son específicos para México. Por ejemplo, en EU el factor de emisión per cápita para solventes comerciales es de 6.3 libras/persona/año (i. e., 2.86 kilogramos/persona/año). Para el inventario de fuentes de área de la Ciudad de México, el DDF ha reducido recientemente la contribución de los aerosoles de 0.36 kg/persona/año a 0.05 kg/persona/año, ajustando así el factor global de emisión general de solventes comerciales per cápita a 2.55 kg/persona/año.

Asimismo, es importante recordar que los factores de emisión basados en censos son más exactos cuando se aplican a toda la región para la que el factor de emisión fue desarrollado que cuando se aplica a regiones más pequeñas. Por ejemplo, el factor específico de emisión de aerosoles per cápita desarrollado para México por el DDF es un factor de emisión “promedio” para todo el país (i. e., se basó en los datos nacionales de población y uso de aerosoles). La exactitud de este factor de emisión disminuye en la medida en que se aplica a regiones más pequeñas. Por ejemplo, si el consumo de aerosoles per cápita en Xochimilco es más alto que el promedio nacional, el uso del factor de emisión “promedio” dará como resultado una subestimación de las emisiones para Xochimilco).

En general, los factores de emisión por empleado son más exactos que los factores de emisión per cápita dado que los niveles de empleo más altos reflejan un crecimiento económico y más específicamente, tienden a reflejar aumentos en los niveles de la actividad generadora de contaminación. Sin embargo, se debe tener cuidado de eliminar los datos de empleo asociados con trabajos que no son de manufactura (e. g., administrativos y clericales), dado que no es probable que contribuyan de manera significativa a los niveles de actividades generadoras de contaminación. Como mínimo, se debe hacer un esfuerzo para eliminar los datos de empleo asociados con los locales de la empresa que sean oficinas administrativas más que plantas de producción.

### **5.2.1 Factores de Emisión Per Cápita**

La evaporación de solventes de los productos comerciales y de consumo tales como ceras, productos en aerosol y limpiadores de ventanas no puede ser determinada de manera rutinaria para muchas fuentes locales por la agencia del lugar. Además, probablemente sería imposible hacer una encuesta que arrojara este tipo de información. Al utilizar factores per cápita se supone que las emisiones en un área dada pueden asociarse con la población de manera razonable. Esta suposición es válida en áreas extensas para ciertas actividades como tintorerías, pintura de superficies arquitectónicas, pequeñas operaciones de desengrasado y evaporación de solventes de productos domésticos y comerciales.

Los factores de emisión per cápita no se deben desarrollar ni utilizar de manera indiscriminada para aquellas fuentes cuyas emisiones no se correlacionan bien con la población. Por ejemplo, las

industrias grandes y concentradas como son las plantas petroquímicas, no deben inventariarse usando factores de emisión per cápita.

Se pueden hallar factores de emisión per cápita específicos para los EU para diversas actividades en numerosas fuentes, incluyendo la base de datos de factores de emisión FIRE de la EPA, en el *AP-42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors* y en *Procedures for the Preparation of Emission Inventories for Carbon Monoxide and Precursors of Ozone*, (U.S. EPA, 1991b).

A continuación se presenta un ejemplo del cálculo de una estimación de emisiones desarrollado utilizando factores de emisión per cápita. El Volumen V - Fuentes de Area proporciona una guía más detallada para el desarrollo de estimaciones de emisión de fuentes de área.

**Ejemplo 6-4:**

Calcular las emisiones de COVs en 1990 del uso doméstico de aerosoles en Xochimilco (DF). Suponer que el contenido de COVs en los aerosoles es del 69%. En 1990 la población se estimó en 642,753 habitantes.

$$FE_{COV} = 0.046 \text{ kg/persona/año} \times 69\% \text{ VOC} \quad (\text{Del DDF, 1995})$$

$$= 0.032 \text{ kg/persona/año}$$

$$P_{Xochimilco} = 642,753 \text{ habitantes}$$

$$E_{COV} = EF_{VOC} \times P_{Xochimilco}$$

$$= 0.032 \times 642,753$$

$$= 20,568 \text{ kg/año}$$

## 5.2.2 Factores de Emisión por Empleado

Este enfoque utiliza los datos de empleo más que los de población como indicador del nivel de la actividad sustituta. En general, los factores de emisión por empleado se usan para estimar las emisiones de aquellas categorías de fuente a las que se ha asignado una clave CMAP y para las que existen datos de empleo disponibles a nivel local (en general, por CMAP). Con frecuencia, esto representa el desarrollo de las categorías CMAP apropiadas. En la mayor parte de los casos, una gran fracción de las emisiones de COVs dentro de un CMAP se calculan usando los procedimientos de fuentes puntuales, por lo que, el enfoque de factores de emisión por empleado puede ser considerado como un procedimiento secundario para cubrir las emisiones de fuentes que están por debajo del límite inferior de corte para fuentes puntuales. La reconciliación con las fuentes puntuales se presenta con más detalle en el Manual de Fuentes de Área (Volumen V).

El siguiente ejemplo de cálculo presenta una estimación de emisiones desarrollada usando factores de emisión per cápita. El Manual de Fuentes de Área (Volumen V) proporciona una guía más detallada para hacer estimaciones de emisiones de fuentes de área.

### Ejemplo 6-5:

Calcular las emisiones anuales de COVs de tintorerías comerciales en la Ciudad de México (DF) para el inventario de fuentes de área. Suponer que los solventes para el lavado en seco son 100% COVs.

Suponer que los registros de empleo para la Ciudad de México muestran que existen 3,000 empleados en el código CMAP apropiado. Suponer que 1,000 de estos empleados trabajan en establecimientos que están incluidos en el inventario de emisiones de fuentes puntuales

$$\begin{aligned}
 FE_{COVs} &= 2,937 \text{ kg/empleado/año} && \text{(EPA-450/4-91-016)} \\
 E_{\text{tintorerías}} &= 3,000 \text{ empleados totales} - 1,000 \text{ empleados de fuentes puntuales} \\
 &= 2,000 \text{ empleados de fuente de área} \\
 E_{COV} &= FE_{COV} \times E_{\text{tintorerías}} \\
 &= 2,937 \times 2,000 \\
 &= 5,874,000 \text{ kg/año}
 \end{aligned}$$

# **7.0 BALANCE DE MATERIALES**

El balance de materiales (también conocido como balance de masa), es un método utilizado comúnmente para estimar las emisiones de muchas categorías de fuentes. El método de balance de materiales puede usarse en los casos en que no hay datos disponibles de muestreos en la fuente, factores de emisión u otros métodos desarrollados. De hecho, para algunas fuentes, un balance de materiales es el único método práctico para estimar las emisiones con exactitud. Por ejemplo, en muchos casos el muestreo en la fuente de emisiones de COVs de bajo nivel, intermitentes o fugitivas puede ser muy difícil y costoso.

El uso de un balance de materiales implica el análisis de un proceso para determinar si las emisiones pueden ser estimadas solamente con el conocimiento de los parámetros específicos de operación y de las composiciones de los materiales. Si bien el balance de materiales es una herramienta valiosa para estimar las emisiones de muchas fuentes su aplicación requiere que se conozca alguna medida del material que está siendo “balanceado” en cada punto a lo largo del proceso. El uso del balance de materiales es muy adecuado en los casos en que pueden hacerse mediciones exactas de todos los componentes, excepto las emisiones al aire. Si no se cuenta con esta información y, por lo tanto debe suponerse, se podrían generar serios errores.

En el inventario de emisiones de COVs, se usa por lo general un balance de materiales generalmente para estimar las emisiones de las fuentes de emisión de evaporación de solventes. Esta técnica es aplicable de igual manera tanto para las fuentes puntuales como para las de área. En las fuentes puntuales se puede usar a nivel de dispositivo o de planta, mientras que en el caso de las fuentes de área el balance de materiales podría aplicarse a nivel regional o nacional.

La Figura 7-1 ilustra algunos ejemplos del uso de balance de materiales para fuentes puntuales. El método más simple de balance de materiales es suponer que todo el solvente consumido por un proceso se evapora durante éste. Por ejemplo, es razonable suponer que durante muchas operaciones de pintura de superficies todo el solvente en la pintura se evapora a la atmósfera durante el proceso de secado. En tales casos, las emisiones simplemente son iguales a la cantidad de solvente aplicado en la pintura (y en los adelgazadores añadidos) como una función del tiempo. Como otro ejemplo, considerar una tintorería que usa solvente Stoddard como agente para lavar. Para estimar las emisiones, la agencia sólo necesita deducir la cantidad de solvente adquirido en cada planta durante el intervalo de tiempo de interés, porque se supone que las emisiones son iguales a la cantidad de solvente comprado.

La suposición de que el solvente de reemplazo es igual a las emisiones también se mantiene en algunas situaciones más complicadas. Si se emplea un dispositivo de control no destructivo como un condensador o un adsorbedor, esta suposición es válida en la medida que el solvente capturado sea regresado al proceso. De manera similar, esta suposición será aplicable si en la planta se practica la recuperación de solvente residual ya sea por destilación o por reducción o sequedad. Ambas prácticas reducen los requerimientos de solvente de reemplazo en una operación y, por lo tanto, la cantidad de solvente que se pierde hacia la atmósfera.

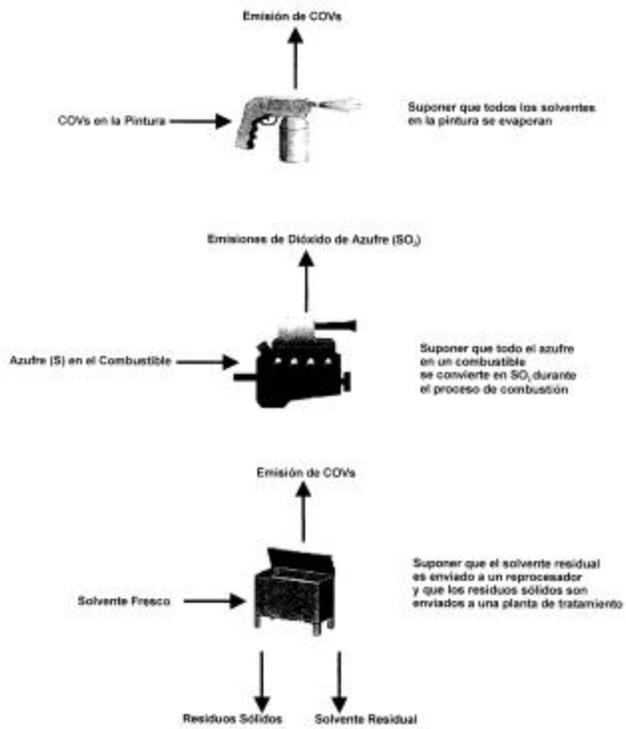


Figura 7-1. Ejemplos de Balance de Materiales

Los métodos de prueba que están disponibles son publicados a través de la *American Society for Testing and Materials* (ASTM) (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales) y se han enfocado en proporcionar información sobre balance de materiales y determinaciones gravimétricas para varios procesos industriales (ASTM, Volúmenes 06.01 y 15.05). En general, el uso de un balance de masa o de materiales para determinar las emisiones totales de un proceso es sencillo y costeable. Los COVs totales emitidos de un proceso de mezclado de pintura por lotes por ejemplo, se calcularía como se muestra a continuación (de acuerdo con el Método D 2369, de la ASTM):

$$\text{COV}_{\text{que entra}} \text{ (lb/gal)} - \text{COV}_{\text{pintura mezclada}} \text{ (lb/gal)} = \text{COV}_{\text{emitidos}} \text{ (lb/gal)} \quad (7-1)$$

Como otro ejemplo, el análisis del combustible puede usarse para predecir las emisiones con base en la aplicación de las leyes de conservación. La presencia de ciertos elementos en los combustibles puede usarse para predecir su presencia en las corrientes de emisión. Esto incluye elementos tóxicos tales como los metales que se encuentran en el carbón así como otros elementos como el azufre que puede ser convertido en otros compuestos durante el proceso de combustión.

La ecuación básica que se usa en los cálculos de emisiones a partir del análisis de combustible es:

$$E = Q_{\text{comb.}} \times \text{Concentración del contaminante en el combustible} \left[ \frac{MW_e}{MW_{cc}} \right] \quad (7-2)$$

Donde:

$Q_{\text{comb.}}$	=	Consumo de combustible, tasa de masa (e.g., kg/hr)
$MW_{ce}$	=	Peso molecular del contaminante emitido (lb/lb-mole)
$MW_{cc}$	=	Peso molecular del contaminante en el combustible (lb/lb-mole)

Por ejemplo, las emisiones de  $\text{SO}_2$  de la combustión de un combustóleo pueden calcularse basándose en la concentración de azufre en el combustóleo. En este enfoque se supone una conversión completa del azufre a  $\text{SO}_2$ . Por lo tanto, por cada libra de azufre ( $\text{PM} = 32 \text{ g}$ ) quemado se emiten dos libras de  $\text{SO}_2$  ( $\text{PM} = 64 \text{ g}$ ).

### Ejemplo 7-1:

Calcular las emisiones de  $\text{SO}_x$  por hora (reportado como  $\text{SO}_2$ ) de una máquina de combustión interna que quema combustible diesel, con base en los datos del análisis del combustible (i. e., el contenido de azufre). El consumo estimado de combustible es de 150 litros/hr. La densidad del diesel es de 0.85 kg/litro (7.1 lb/gal). El contenido de azufre el diesel es 0.05% en masa.

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{comb.}} &= 150 \text{ litros/hr} \times 0.85 \text{ kg/litro} \\
 &= 127.5 \text{ kg/hr} \\
 C_S &= 0.05/100 \\
 &= 0.0005 \\
 E_{\text{SO}_2} &= Q_{\text{comb.}} \times C_S \times (MW_D / MW_f) \\
 &= 127.5 \times 0.0005 \times (64/32) \\
 &= 0.13 \text{ kg/hr}
 \end{aligned}$$

En los ejemplos anteriores el balance de materiales se simplifica porque se supone que todo el material que se está balanceando es emitido a la atmósfera. Existen situaciones en las que esta suposición no siempre es razonable. Por ejemplo, si se usa un dispositivo de control destructivo, como un postquemador, un incinerador o una unidad de oxidación catalítica en el escape del proceso, cualquier emisión de COVs será destruida o alterada de modo que no sería posible suponer las características y cantidades de COVs que queden, sin analizar la corriente que sale del dispositivo. Como otro ejemplo, las emisiones del desengrasado no son iguales al consumo de solvente si el solvente residual es vendido a un reciclador comercial. En esta situación las emisiones serán la diferencia entre el solvente consumido y el solvente enviado a reprocesamiento. En un ejemplo más, se cree que alguna fracción del diluyente usado para licuar asfalto rebajado es retenida en el pavimento y no se evapora después de la aplicación.

$$\begin{aligned} Q_{\text{solvente}} &= (100 \text{ litros/mes} + 20 \text{ litros/mes}) \times 1.5 \text{ kg/litro} \\ &= 180 \text{ kg/mes} \\ Q_{\text{residual}} &= (100 \text{ litros/mes} \times 1.5 \text{ kg/litro} \times 98\% \text{ VOC}) + \\ &\quad (0.2 \text{ kg/mes} \times 5\% \text{ VOC}) \\ &= 147 \text{ kg/mes} + 0.01 \text{ kg/mes} \\ &= 147 \text{ kg/mes} \\ E_{\text{COV}} &= Q_{\text{solvente}} - Q_{\text{residual}} \\ &= 180 - 147 \\ &= 33 \text{ kg/mes} \end{aligned}$$

El ejemplo anterior muestra que, en algunos casos el suponer la evaporación total de todo el solvente consumido resultaría en una sobrestimación de las emisiones. Por lo tanto, los balances de materiales también pueden usarse junto con factores de emisión basados en el proceso (ver Sección 6.1) para estimar las emisiones. Estos balances serían como aquellos que se basan en la diferencia entre la materia prima y el producto cuando el factor de emisión para un proceso está dado por unidad de material consumido.

Por ejemplo, se puede hacer balances de materiales para calcular las emisiones de fuentes de área que incluyan la manufactura, distribución y consumo de combustibles (ver Figura 7-2). Recientemente se aplicó en EU un balance de materiales para la distribución y consumo de combustibles (De Luchi, 1993). Un balance de materiales a nivel nacional para solventes en pinturas podría ser también el mejor método para estimar las emisiones de COVs de esta categoría de fuentes o de la aplicación de plaguicidas.

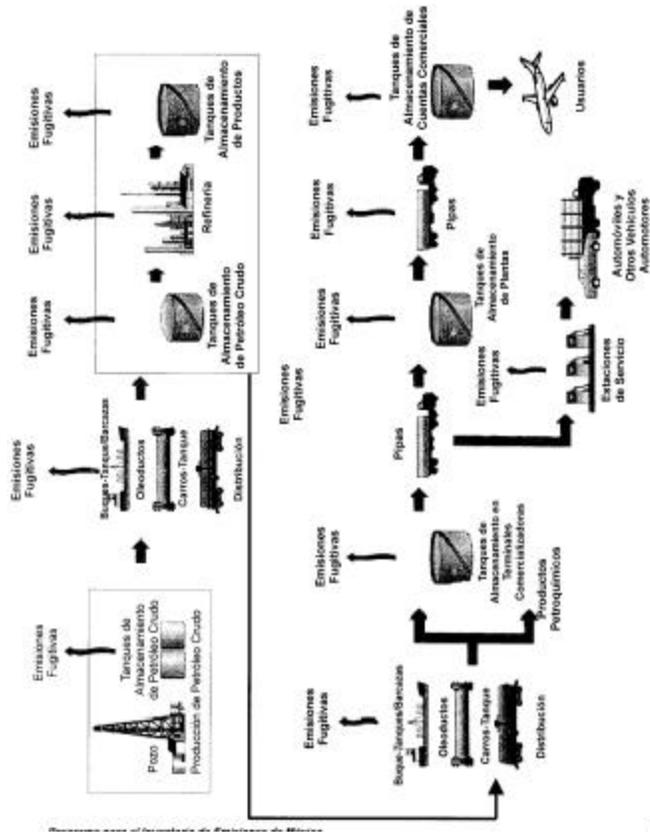


Figura 7-2. Ejemplo de Balance de Materiales. Resaltando las Emisiones Fugitivas

Hay otras situaciones que pueden complicar el balance de materiales. En primer lugar, no todas las pérdidas de solventes de ciertas operaciones como el lavado en seco o el desengrasado, se dan en el sitio de la planta. En cambio se pueden evaporar, cantidades significativas de solventes en el sitio de disposición del solvente residual, a menos que sea incinerado o dispuesto en una manera que impida la subsecuente evaporación a la atmósfera. En general, se puede suponer que gran parte del solvente enviado a sitios de disposición se evaporará. La agencia debe determinar si una parte del solvente asociado con varias operaciones se evapora en el punto de disposición más que en el punto de uso, ya que estas pérdidas pueden presentarse fuera del área cubierta por el inventario.

No se pueden emplear balances de materiales en algunos procesos de evaporación debido a que la cantidad de material perdido es demasiado pequeña para ser determinada con exactitud usando los procedimientos de medición convencionales. Por ejemplo, la aplicación de balances de materiales a los tanques de almacenamiento de productos del petróleo no es factible, por lo general debido a que las pérdidas por respiración y por operación son demasiado pequeñas con respecto a la capacidad total promedio o a la producción para ser determinadas a partir de los cambios en la cantidad de material almacenado en cada tanque. En estos casos, deben aplicarse las ecuaciones de emisión del AP-42 (i. e., modelos) desarrolladas por procedimientos especiales.

En resumen, con excepción de algunos tipos de fuente tales como los ejemplos de uso de combustibles y de solventes presentados anteriormente, no se recomienda un enfoque de balance de materiales como el método principal para la estimación de emisiones. El balance de materiales debe ser utilizado más bien como un método de “arriba hacia abajo” para evaluar qué tan razonables son las estimaciones de emisión generados al usar otras técnicas.

# 8.0 EXTRAPOLACION

---

Las técnicas de extrapolación pueden usarse para calcular emisiones directamente y para verificar las estimaciones de emisiones calculadas con otros métodos. La Figura 8-1 ilustra el concepto general de la extrapolación de emisiones. En general, la extrapolación de emisiones de una región geográfica a otra se considera como el enfoque menos deseable para la estimación de emisiones. Este enfoque puede no tomar en cuenta de manera apropiada algunas diferencias importantes entre dos regiones y puede propagar los sesgos de un inventario a otro.

Sin embargo, cuando se combina con un marco de modelado, la extrapolación es un enfoque práctico y costo-efectivo para desarrollar estimaciones de emisiones para aquellas regiones en las que la información no es suficiente para soportar metodologías de estimación más rigurosas. El resto de esta sección presenta algunos ejemplos sobre la manera en que la extrapolación puede usarse para desarrollar estimaciones de emisiones.

En primer lugar, los datos de emisiones de un tipo de proceso o de planta, pueden ser extrapolados a tipos de fuente o de planta similares. Este tipo de extrapolación se usaría para hacer estimaciones de emisiones de fuentes puntuales.

En otros casos si se puede argumentar que las condiciones socioeconómicas entre dos o más regiones geográficas son comparables los datos disponibles de emisiones de fuentes de área para una región pueden ser extrapolados a las demás regiones basándose en datos de población y de empleo. Los inventarios de emisiones generados en EU y en Europa pueden usarse de esta manera. En México, los inventarios de emisiones que se han generado para la Ciudad de México y que se están desarrollando para otras zonas (e. g., el área metropolitana de Monterrey) se pueden usar como base para el aseguramiento de calidad y/o para desarrollar partes de los inventarios de emisiones de otras regiones.

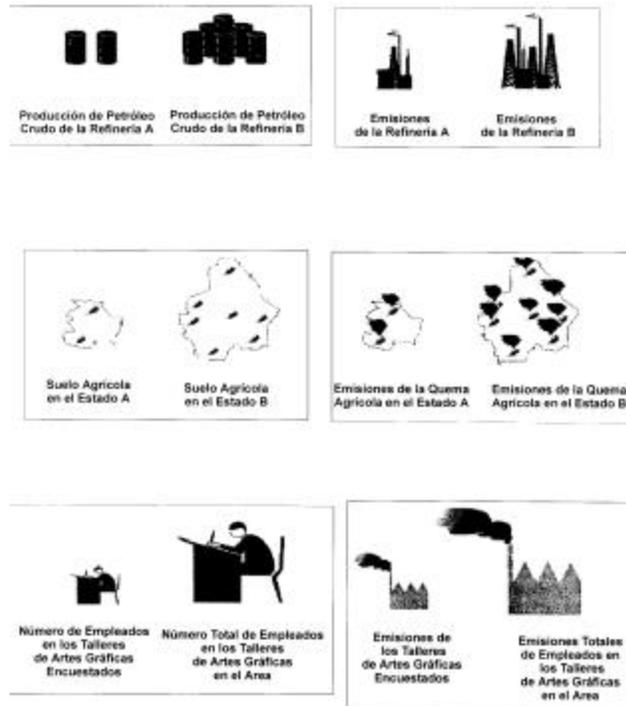


Figura 8-1. Ejemplos de Extrapolación

**Ejemplo 8-1:**

Con base en los cálculos detallados de emisiones para la Refinería A se estima que las emisiones anuales totales de COVs son de 100 toneladas (métricas). La compañía acaba de adquirir una planta más pequeña, la Refinería B, que procesa el equivalente a la mitad del petróleo crudo de la Refinería A. Para la reunión de mañana, el presidente de la compañía desea una estimación del costo total asociado con las emisiones permitidas de COVs. Puesto que no hay tiempo para hacer cálculos detallados de emisiones para la Refinería B, estimar las emisiones de COVs extrapolando los datos de la Refinería A con base en las capacidades de las refinerías (i. e., la cantidad de petróleo crudo procesado).

$$\begin{aligned}
 E_{\text{COVb}} &= E_{\text{COVa}} \times P_{\text{CRUDOb}}/P_{\text{CRUDOa}} \\
 &= 100 \text{ toneladas/año} \times \frac{1}{2} \\
 &= 50 \text{ toneladas/año}
 \end{aligned}$$

**Ejemplo 8-2**

Basándose en una encuesta se estima que las emisiones totales anuales de COVs de la quema agrícola en el Estado A son de 50 toneladas (métricas). No hay recursos para financiar una encuesta similar en el Estado B. Puesto que las condiciones agrícolas son muy semejantes en el Estado B (e. g. similares cultivos, métodos agrícolas, etc.), estimar las emisiones de COVs extrapolando los datos del Estado A, con base en la superficie del suelo agrícola en cada estado. Los mapas de uso de suelo muestran 400,000 m<sup>2</sup> de suelos agrícolas en el Estado A, y 50,000 m<sup>2</sup> en el Estado B.

$$\begin{aligned}
 E_{\text{COVb}} &= E_{\text{COVa}} \times A_{\text{SAb}}/P_{\text{SAa}} \\
 &= 50 \text{ toneladas/año} \times 50,000/400,000 \\
 &= 6.25 \text{ toneladas/año}
 \end{aligned}$$

Este enfoque también puede usarse cuando la agencia encuesta solamente una fracción de las fuentes de área dentro de una categoría dada. En este caso se usa el empleo como indicador para "escalar" el inventario para contabilizar de manera colectiva las fuentes de emisión y las emisiones en el inventario de fuentes de área. Para calcular estimaciones de emisiones se pueden usar otros parámetros distintos al empleo, tales como los datos de ventas o el número de plantas. Sin embargo, el empleo es por lo general el parámetro más fácilmente disponible. El escalamiento de las estimaciones de emisiones se presenta también en la sección 5.0 de este manual.

**Ejemplo 8-3**

Se está realizando una encuesta para recopilar las estimaciones de emisiones de COVs de pequeños talleres de artes gráficas en Coyoacán para usarlos en el inventario de fuentes de área de la Ciudad de México. Debido a las limitaciones en los recursos, el cuestionario fue enviado solamente a algunos de los talleres en Coyoacán y no todos los que están incluidos en la lista de distribución devolvieron el cuestionario. Las emisiones totales anuales de COVs reportadas en los cuestionarios son de 100 toneladas (métricas). Dado que no existen recursos para encuestar a cada pequeño taller de artes gráficas, estimar las emisiones de COVs en Coyoacán extrapolando (i. e., escalando) las emisiones de COVs recopiladas con base en el empleo. Los registros de empleo disponibles muestran que 500 personas en Coyoacán trabajan en la industria de las artes gráficas y los cuestionarios muestran que un total de 125 personas trabajan en los talleres que llenaron las formas de la encuesta.

$$\begin{aligned} E_{\text{COVcov}} &= E_{\text{COVsur}} \times P_{\text{cov}}/P_{\text{sur}} \\ &= 100 \text{ toneladas/año} \times 500/125 \\ &= 400 \text{ toneladas/año} \end{aligned}$$

# 9.0 REFERENCIAS

40 CFR 60, 1992. U.S. Code of Federal Regulations. Title 40, Part 60, Appendix A.

DeLuchi, M.A., 1993. "Emissions from the Production, Storage, and Transport of Crude Oil and Gasoline." *J. Air Waste Manage Association*. 43:1486-1495.

Cochran, 1977. *Sampling Techniques*. John Wiley and Sons. William G. Cochran.

DDF, 1995. *Elaboración de Factores de Emisión Per Cápita Para la Ciudad de México*. April 1995.

Economopoulos, A.P., 1993. *Assessment of sources of Air, Water, and Land Pollution - A Guide to Rapid Source Inventory Techniques and their use in Formulating Environmental Control Strategies*. Report prepared for World Health Organization, Geneva.

Gilbert, 1987. *Statistical Method for Environmental Pollution Monitoring*. Richard O. Gilbert Van Nostrand Reinhold Company, NY. 1987.

Holman and Collins, 1979. *Development of Questionnaires for Various Emissions Inventory Uses*. EPA-450/3-78-122. U.S. EPA Research Triangle Park, North Carolina.

IPCC, 1993b. *National GHG Inventories: In-Depth Review, Part III*. Report prepared by the IPCC/OECD Joint Work Programme on National Inventories of Greenhouse Gas Emissions, Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group I Secretariat, Bracknell, UK, April.

IPCC, 1993a. *National GHG Inventories: Transparency in Estimation and Reporting, Parts I and II*. Report prepared by the IPCC/OECD Joint Work Programme on National Inventories of Greenhouse Gas Emissions, Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group I Secretariat, Bracknell, UK, April.

Stultz and Kitto, 1992. *Steam, Its Generation to Use*.

U.S. EPA, 1988. *Control of Open Fugitive Dust Sources*. EPA-450/3-88-008.

U.S. EPA, 1990. *The User's Manual for the PM<sub>10</sub> Open Fugitive Dust Source Computer Model Package*.

U.S. EPA, 1991a. *Nonroad Engine and Vehicle Emission Study Report*. November 1991. EPA-21A-2001.

U.S. EPA, 1991b. *Procedures for the Preparation of Emission Inventories for Carbon Monoxide and Precursors of Ozone, Volume I: General Guidance for Stationary Sources*. May 1991. EPA-450/4-91-016.

U.S. EPA, 1992. *Fugitive Dust Background Document and Technical Information Document for Best Available Control Measures*. September 1992. EPA-450/2-92-004.

U.S. EPA, 1994. *Air Emissions Models for Waste and Wastewater*. U.S. EPA Contract No. 68D10118. November 1994.

U.S. EPA, 1995a. *Compilation of Air Pollutant Emission Factors - Volume I: Stationary Point and Area Sources, Fifth Edition and Supplement A, AP-42*, U.S. Environmental Protection Agency. Research Triangle Park, North Carolina. January 1995.

U.S. EPA, 1995b. *Factor Information Retrieval System (FIRE), Version 4.0*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, North Carolina. June 1995.

U.S. EPA, 1996. *TANKS Software Program, Version 3.0*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, North Carolina. February 1996.

**APENDICE III - A**  
**EJEMPLOS DE LOS CALCULOS PARA**  
**LOS MODELOS DE EMISIONES**

### Ejemplo de Cálculos - Polvos Fugitivos

(4-12)

$$M = VKT \times EF$$

donde: M = tasa promedio anual de emisión en masa, kg/año;  
 VKT = kilómetros recorridos por los vehículos VKT/año;  
 FE = factor de emisión, kg/VKT.

$$FE = k (1.7) \left( \frac{s}{365} \right) \left( \frac{S}{24} \right) \left( \frac{W}{4} \right)^{0.7} \left( \frac{w}{12} \right)^{0.5} \left( \frac{365-p}{2.7} \right) \quad (4-13)$$

$$FE = k (5.9) \left( \frac{s}{365} \right) \left( \frac{S}{24} \right) \left( \frac{W}{4} \right)^{0.7} \left( \frac{w}{12} \right)^{0.5} \left( \frac{365-p}{2.7} \right) \quad (4-14)$$

donde: FE = factor de emisión  
 k = multiplicador del tamaño de partícula (adimensional)  
 s = contenido de sedimentos en el material de recubrimiento de los caminos (%);  
 S = velocidad media del vehículo, km/hr (mph);  
 W = peso medio del vehículo, Mg (ton);  
 w = número medio de ruedas  
 p = número de días al año con una precipitación mínima de 0.254 mm (0.01 in.).

Calcular las emisiones anuales de PM<sub>10</sub> (i. e., utilizando un multiplicador de tamaño aerodinámico de partícula de 0.36) a partir de caminos rurales de terracería con un contenido promedio de sedimentos de 12 por ciento. Suponer que el peso medio del vehículo es de 4 Mg, la velocidad media del vehículo es de 25 km/hr y el número medio de ruedas es cuatro. Asimismo, el número medio de días al año con una precipitación superior a 0.254 mm es de 40, y el número de kilómetros recorridos por los vehículos es de 3,650,000 km/año.

$$FE = 0.36 (1.7) \left( \frac{12}{365} \right) \left( \frac{25}{24} \right) \left( \frac{4}{4} \right)^{0.7} \left( \frac{4}{12} \right)^{0.5} \left( \frac{365-40}{2.7} \right) \quad 24$$

$$= 0.3737 \text{ kg/VKT}$$

$$M = (3,650,000) \times (0.3737)$$

$$= 1,364,000 \text{ kg PM}_{10}/\text{año}$$

### Ejemplo de Cálculos —Rellenos Sanitarios

(4-11)

$$Q_{\text{CH}_4} = L_0 \times R \times (e^{-kc} - e^{-kt})$$

donde:  $Q_{\text{CH}_4}$  = tasa de generación de metano en el tiempo  
 $t$ ,  $\text{m}^3/\text{año}$ ;  
 $L_0$  = potencial de generación de metano,  $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{Mg}$  desperdicios;  
 $R$  = tasa promedio anual de aceptación de desperdicios durante la vida activa,  $\text{Mg}/\text{año}$ ;  
 $e$  = base de logaritmos naturales, sin unidades;  
 $k$  = constante de la tasa de generación de metano,  $\text{año}^{-1}$ ;  
 $c$  = tiempo transcurrido desde el cierre del relleno, años ( $c=0$  para rellenos activos) y  
 $t$  = tiempo transcurrido desde la colocación inicial de desperdicios, años.

Calcular las emisiones anuales de metano de un relleno sanitario activo que ha estado abierto durante 15 años y que ha aceptado desperdicios a una tasa promedio de 10,000  $\text{Mg}/\text{año}$ . Suponer un potencial de generación de metano de 125  $\text{m}^3/\text{Mg}$  y una constante de la tasa de generación de metano de 0.02/año

$$\begin{aligned} Q_{\text{CH}_4} &= (125 \text{ m}^3 \text{ Mg}) \times (10,000 \text{ Mg/año}) \times (e^{-(0.02/\text{año})(0 \text{ año})} - e^{-(0.02/\text{año})(15 \text{ año})}) \\ &= 125 \times 10,000 \times (1 - 0.7408) \\ &= 324,000 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{año} \end{aligned}$$

## **Ejemplo de Cálculos—Polvos Fugitivos**

## **Ejemplo de Cálculos —Rellenos Sanitarios**

**Ejemplo de Cálculo —Tanques de Almacenamiento**

**Ejemplo de Cálculo —Carga de Productos  
Derivados  
del Petróleo**

## **Ejemplo de Cálculo —Residuos y Aguas Residuales**

**APENDICE III-B**

**COMO OBTENER LAS HERRAMIENTAS DE ESTIMACION DE  
LAS EMISIONES AL AIRE DE LA EPA**

APENDICE III-C

EJEMPLO DEL CUESTIONARIO DE FUENTES PUNTUALES  
(I. E., ENCUESTA INDUSTRIAL del INE)